

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

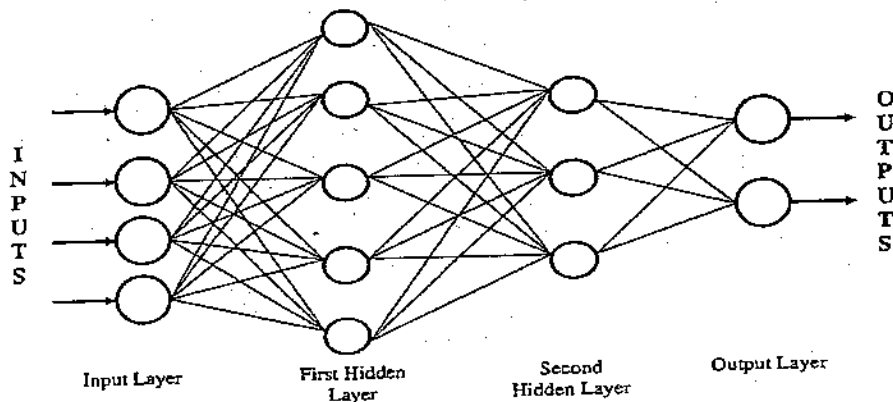
ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ

ΤΡΙΒΗ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΧΡΗΣΗΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ Γ. ΚΑΤΕΡΕΛΟΣ
Δρ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ



General configuration of an artificial neural network.

ΜΑΛΛΙΑΡΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ – ΤΖΑΝΕΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
Α.Μ 4156 Α.Μ 4015

ΠΑΤΡΑ 2006

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τριβή ονομάζουμε την αντίσταση στην κίνηση που αναπτύσσεται όταν ένα σώμα κινείται ή τείνει να κινηθεί πάνω σε ένα άλλο.

Τα σώματα μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Ανάλογα με τη φύση των σωμάτων έχουμε τα παρακάτω είδη τριβής.

- Μηχανική τριβή όταν και τα δύο σώματα είναι στερεά.
- Υδροδυναμική τριβή όταν το ένα σώμα είναι στερεό και άλλο υγρό.
- Αεροδυναμική τριβή όταν το ένα σώμα είναι στερεό και το άλλο αέριο.

Ανάλογα με το είδος της κίνησης έχουμε.

- Την τριβή ολίσθησης όταν το ένα σώμα ολισθαίνει πάνω στο άλλο.
- Την τριβή κύλισης όταν το ένα σώμα κυλιέται πάνω στο άλλο.

Φθορά: ονομάζουμε την απόσπαση υλικού από τις στερεές επιφάνειες εξ αιτίας της μηχανικής ενέργειας.

Το αντικείμενο της φθοράς είναι σχεδόν ανυπολόγιστης οικονομικής σημασίας, γιατί είναι ο παράγοντας αυτός, που περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο καθορίζει τη χρήσιμη ζωή των περισσότερων μηχανολογικών μηχανισμών.

Το χαρακτηριστικό της διαδικασίας της φθοράς είναι ότι προχωρά πολύ αργά και η ποσότητα του υλικού που φθείρεται είναι πολύ μικρή.

Σύνθετα υλικά: Ορίζουμε σαν σύνθετο υλικό αυτό που αποτελείται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά, τα οποία συνδυάζονται για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που κανένα από τα συμμετέχοντα συστατικά δεν μπορεί από μόνο του να επιτύχει. Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από τη συνύπαρξη δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα, χαρακτηριζόμενο ως συστατικό ενίσχυσης, προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές κυρίως ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό, το οποίο καλείται μήτρα, είναι χαμηλής πυκνότητας, συνήθως και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Ο νευρώνας: είναι ένας εξειδικευμένος τύπος κυττάρου, που αποτελεί τη βασική μονάδα των συστημάτων επεξεργασίας πληροφοριών που απαρτίζουν το νευρικό σύστημα. Έτσι, σε αναλογία με τους Ηλεκτρονικούς Υπολογιστές (Η/Υ), οι νευρώνες αποτελούν το σύνολο των στοιχείων μνήμης, λογικών κυκλωμάτων και εντολών λειτουργίας του εγκεφάλου.

Το βασικότερο χαρακτηριστικό του νευρώνα είναι η ερεθιστότητα του, δηλαδή, η ικανότητα του να αντιδρά σε διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα (ηλεκτρομαγνητικά, θερμικά, μηχανικά, χημικά κλπ.). Αυτή η αντίδραση έχει την μορφή ηλεκτροχημικής διαταραχής της μεμβράνης που μεταδίδεται, από το σημείο ερεθισμού στην επιφάνεια του νευρώνα, προς τις τελικές απολήξεις του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχουμε συνηθίσει να κατατάσσουμε τα υλικά σε μεταλλικά, κεραμικά και οργανικά. Η διάκριση μεταξύ των τριών αυτών κατηγοριών ομοιογενών υλικών, με βάση τη χημική σύσταση, τη δομή και τις ιδιότητες, φυσικές και μηχανικές, είναι σαφής. Ως σύνθετο υλικό, λοιπόν, ορίζεται το υλικό που αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά, τα οποία συνδυάζονται για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που κανένα από τα συμμετέχοντα συστατικά δεν μπορεί από μόνο του να επιτύχει. Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από τη συνύπαρξη δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα, χαρακτηριζόμενο ως συστατικό ενίσχυσης, προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές κυρίως ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό, το οποίο καλείται μήτρα, είναι χαμηλής πυκνότητας, συνήθως και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Η επιστήμη και τεχνολογία των σύνθετων υλικών βασίζεται στην αντίληψη του σχεδιασμού ο οποίος είναι βασικά διαφορετικός από εκείνων των συμβατικών υλικών. Τα μεταλλικά κράματα, για παράδειγμα, γενικά δεικνύουν ένα ομοιόμορφο πεδίο ιδιοτήτων, οπότε μπορεί να επεξεργαστούν σαν ομοιογενή και ισότροπα υλικά. Τα ινώδη σύνθετα υλικά, από την άλλη πλευρά, δείχνουν έναν μεγάλο βαθμό μεταβολών στη μικροδομή τους, ο οποίος είναι αποτέλεσμα των ανομοιομορφιών και ανισότροπων ιδιοτήτων. Επί πλέον, τα μεταλλικά υλικά μπορούν να διαμορφωθούν στα επιθυμητά γεωμετρικά σχήματα δια μέσου δευτερευόντων εργασιών, όπου η μακροσκοπική διαμόρφωση και μικροδομή του αντικειμένου συνδέεται με την πορεία της επεξεργασίας του. Για τα ινώδη σύνθετα η σχέση ανάμεσα στη μικροδομή και στη μακροσκοπική κατάσταση, και η εξάρτηση της από τη διαδικασία παραγωγής είναι ισχυρότερη. Σαν αποτέλεσμα, η τεχνολογία των συνθέτων υλικών προσφέρει πολύ μεγάλο δυναμικό στο σχεδιασμό υλικών για τη τελική χρήση σε διαφορετικές εφαρμογές.

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η εσωτερική δομή ενός αντικειμένου μπορεί να ελεγχθεί μέσω της πορείας παραγωγής του. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η χύτευση κοντόινων συνθέτων όπου ο προσανατολισμός των ινών το μήκος των ινών και η κατανομή τους μπορεί να ελεγχθεί για να παράγει τις επιθυμητές τοπικές ιδιότητες. Η επιθυμητή τοπική αντοχή σκληρότητα και άλλες ιδιότητες μπορεί να επιτευχθούν ελέγχοντας το τύπο των ινών και το επί τοις εκατό ποσοστό των ινών στην κατασκευή.

Το εξωτερικό γεωμετρικό σχήμα μιας κατασκευής από σύνθετα υλικά μπορεί επίσης να σχεδιαστεί. Σήμερα είναι δυνατόν να κατασκευάσουμε τρισδιάστατα ινώδη αντικείμενα χρησιμοποιώντας προχωρημένη τεχνολογία νημάτων. Καθώς η βεβαιότητα να κατασκευάσουμε μεγαλύτερες και πολυπλοκότερες κατασκευές καθαρής μορφής είναι πλέον επταυξημένες μειώνεται όμως η απαίτηση για την μορφοποίηση και το συνδυασμό μεγάλου αριθμού από μικρά τμήματα.

Η ολοκλήρωση και προσέγγιση του συστήματος, κυμαινόμενη από τη μικροδομή μέχρι το καθαρό σχήμα του αντικειμένου, προσφέρει σχεδόν απεριόριστη δυνατότητα στην πορεία παραγωγής των συνθέτων υλικών. Η αυξανόμενη

ερευνητική δραστηριότητα στον κλάδο των συνθέτων υλικών έχει δώσει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα και τα σύνθετα βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυπηγική και αεροναυπηγική βιομηχανία.

2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

2.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

Η μηχανική αντοχή των συνθέτων υλικών που δεν ισούται πάντοτε με το μέσο όρο των αντοχών των δύο συστατικών, εξαρτάται από το υλικό της ενίσχυσης, το υλικό της μήτρας, τη μηχανική συμπεριφορά των δύο, αλλά και από τη μεταξύ τους "συμβατότητα", αφού η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι καίριας σημασίας για την αντοχή του σύνθετου. Καθοριστικό, επίσης, παράγοντα για την αντοχή του σύνθετου αποτελεί η κατ'όγκον αναλογία των ινών και ο προσανατολισμός τους ως προς τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης. Ενδεικτικό της σπουδαιότητας των ινών είναι το γεγονός ότι ο προσανατολισμός και η διάταξη τους στη μάζα της μήτρας, αποτελεί κριτήριο για την ταξινόμηση των συνθέτων αυτής της κατηγορίας

1. Στα μονοδιευθυντικά σύνθετα οι ίνες προσανατολίζονται προς την ίδια διεύθυνση, ενώ
2. Στα πολυδιευθυντικά σύνθετα οι ίνες προσανατολίζονται προς διάφορες διευθύνσεις. Τα πολυδιευθυντικά σύνθετα υλικά διακρίνονται, με τη σειρά τους, σε υλικά στα οποία,
 - οι ίνες έχουν τυχαίες διευθύνσεις,
 - οι ίνες έχουν πλέξη ύφανσης και
 - οι ίνες έχουν τρισσορθογώνια ύφανση.

2.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

2.2.1 Ενισχυτικές ίνες (reinforcing fibers)

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλή στιβαρότητα (υψηλό μέτρο ελαστικότητας, E), υψηλή τιμή τάσης θραύσης και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα (ρ). Στα προηγμένα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ενισχυτικές ίνες από γυαλί, άνθρακα, πολυμερές, φυσικά ορυκτά, ή ακόμα και μεταλλικές ή κεραμικές ίνες.

1. ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (glass fiber)

Στα σύνθετα υλικά πρώτης γενιάς (1940), ως ενισχυτικά χρησιμοποιήθηκαν ίνες γυαλιού. Η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς και σήμερα και γενικά θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, R και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες φαίνονται στον πίνακα 1

ΠΙΝΑΚΑΣ III.1. Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	R	S	SiO ₂ κάθαρη
ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

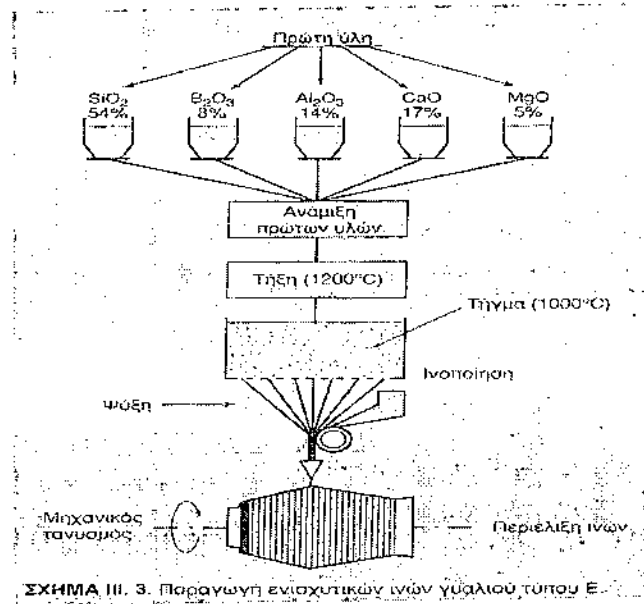
Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες ίνες γυαλιού είναι τύπου E. Αυτές παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες, καλά χαρακτηριστικά διαμόρφωσης, καλή αντοχή στην υγρασία και μέτρια ανθεκτικότητα σε χημικά αντιδραστήρια.

Οι ίνες τύπου R και τύπου S έχουν κάνει πρόσφατα την εμφάνισή τους. Έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E και παρουσιάζουν χημική αδράνεια, είναι όμως ακριβότερες.

Για μεγάλα ποσοστά σε SiO₂ (>99,5%) αυξάνονται οι μηχανικές ιδιότητες της ίνας, καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης του συνθέτου. Γι'αυτό και χρησιμοποιούνται ίνες από 100 % καθαρή πυριτία, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των ινών γυαλιού είναι η μεγάλη τους ευαισθησία σε λύσεις της συνέχειας της επιφάνειάς τους. Χαράξεις και γρατζουνιές δημιουργούν στην επιφάνεια της ίνας περιοχές συγκέντρωσης τάσεων με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Η παραγωγή των ινών γίνεται με διέλαση τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (σχήμα III.3).



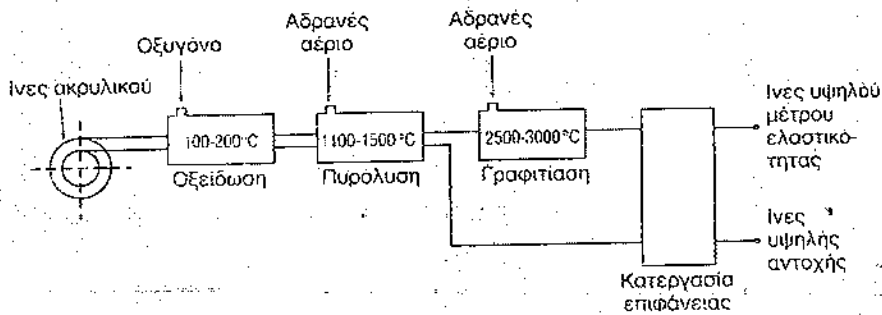
Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται. Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητους πυθμένες (διάμετρος οπών 1-2 mm). Κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα και οι παραγόμενες ίνες εξολκεύονται με μηχανική μέθοδο, μέχρι τελικής διαμέτρου 1-15 μm. Εν συνεχεία, οι ίνες περιτυλίγονται γύρω από κυλινδρικό τύμπανο, το οποίο περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα. Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος μέσα στη δεξαμενή, την πυκνότητά του, τη διάμετρο των οπών, καθώς επίσης, και την ταχύτητα περιστροφής του τύμπανου.

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους, θα πρέπει να αποφεύγεται η επαφή των ινών μεταξύ τους, καθώς και με άλλα αντικείμενα τα οποία πιθανόν να προκαλέσουν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα. Πολλές φορές, την παραγωγή ινών κατάλληλης διαμέτρου ακολουθεί η επίστρωσή τους με προστατευτικές επικαλύψεις.

2. ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (carbon fibers)

Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων (carbon fibers), είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση, καθώς και ο χαμηλός συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή.

Στην παραγωγή ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται ίνες του πολυμερούς πολυακρυλονιτρίλιου (PAN). Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες PAN πραγματοποιείται σε τρία στάδια (σχήμα 4):



ΣΧΗΜΑ III. 4. Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα.

σχήμα 4. Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

- Οξείδωση υπό τάση, των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 °C). Η ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100-1500 °C. Οι παραγόμενες ίνες από αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers). Η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000 °C). Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται γραφίτιση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, η οποία οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus carbon fibers). Έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξείδωση και πυρόλυση), ίνες υψηλής αντοχής, και σε τρία στάδια (οξείδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

ΠΙΝΑΚΑΣ . 2. Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 °C και για τους δύο τύπους ινών. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για το σχεδιασμό του συνθέτου θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας.

Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες, δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διεύθυνσης των ινών αυτών καθορίζει και το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία. Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών, της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων δίνει τη δυνατότητα παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφίτισης και, κατά συνέπεια, διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφίτισης και το βαθμό ανισοτροπίας.

Τέλος, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

3. ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (polymer fibers)

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar.

Δεν είναι παρά υπόθεση των τελευταίων χρόνων ή παρασκευή ινών αρωματικών πολυαμιδίων (αραμιδίων/aramide), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά ως υλικό ενίσχυσης, υπερβαίνοντας το πρόβλημα της χαμηλής στιβαρότητας των συνθετικών πολυμερών. Το μέτρο ελαστικότητας των ινών αυτών είναι ίσο ή και υψηλότερο αυτού των ινών γυαλιού. Οι βασικές ιδιότητες των ινών αραμιδίων, εκ των οποίων ευρύτερα γνωστές είναι αυτές με την εμπορική ονομασία Kevlar, φαίνονται στον πίνακα III.3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4,5	2
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,45	1,45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

Στο σχήμα 5 φαίνεται η διάταξη παραγωγής ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου.

Ινες αραμιδίων χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά συνθέτων υλικών υψηλών προδιαγραφών, για τα οποία υπάρχουν απαιτήσεις χαμηλού βάρους, υψηλής αντοχής και στιβαρότητας και αντοχής σε κόπωση. Το κόστος παραγωγής ινών αραμιδίων είναι ακόμα πολύ υψηλό, διπλάσιο περίπου του κόστους παραγωγής ινών άνθρακα.

4. ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Αρκετά ορυκτά, στη φυσική τους κατάσταση, βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή

5. ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

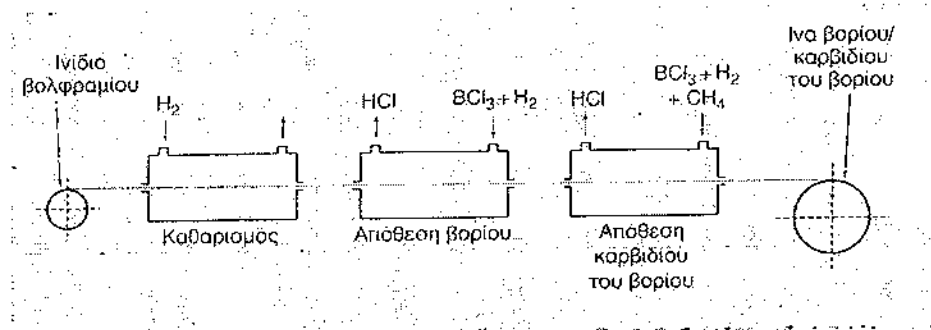
Διάφορα μέταλλα (κυρίως βόριο, βηρύλλιο και βολφράμιο) παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό τους βάρος (ειδική ακαμψία). Θα μπορούσαν, λοιπόν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών. Ωστόσο, οι τεχνικές παραγωγής τέτοιων ινών είναι ακόμα πολύ δαπανηρές.

Το **Βόριο** είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό, για την κατασκευή ινών ενίσχυσης. Ως συμπαγές υλικό είναι σκληρό και εύθραυστο και, επομένως, η κατασκευή ινών με μηχανουργική κατεργασία καθίσταται αδύνατη. Σήμερα, χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου:

- **Αναγωγή από αλογονίδιο του Βορίου.**

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως BCl_3) ανάγεται από υδρογόνο σε κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας (1100°C) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10-15 μm (σχήμα 6). Το νήμα θερμαίνεται εξαιτίας του φαινομένου Joule που αναπτύσσεται κατά την απόθεση και απαιτείται αυστηρός έλεγχος της θερμοκρασίας ώστε να ληφθεί επίστρωμα μικροσκοπικών κρυστάλλων βορίου, διαμέτρου 2-3 nm.

Η διάμετρος των ινών που παράγονται μ'αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ 100 και 200 μm . Οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.



Σχήμα 6. Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου

- **Απόθεση με τεχνική CVD.**

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται εξίσου και η τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου. Η τεχνική είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη, αλλά το προϊόν έχει χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Γενικά, οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή ($E = 300-420 \text{ GPa}$, $\sigma_{TS} = 3000-3700 \text{ MPa}$), ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους 500°C . Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (οι ονομαζόμενες ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου. Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας. Πράγματι, σε υψηλές θερμοκρασίες έχουμε διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό μέσομεταλλικών ενώσεων. Αυτές είναι πολύ εύθραυστες και προκαλούν την αστοχία του συνθέτου. Τα παραπάνω αφορούν κυρίως μεταλλικές μήτρες τιτανίου και αλουμινίου.

Τέλος, το υψηλό κόστος παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης, περιορίζει το πεδίο χρήσεών τους σε μερικές ειδικές εφαρμογές της αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής.

6. ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (ceramic fibers)

Οι κεραμικές ίνες που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου και αλούμινας, και λιγότερο οι ίνες Si_3N_4 , BeO , B_4C και ZrO_2 .

Ινες, μεγάλης αντοχής, από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) μπορούν να παραχθούν με χημική -εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου (π.χ. μεθυλοδιχλωροσιλάνιο). Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400°C , ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900°C , λόγω της σημαντικής δραστηριότητάς του, πάνω από αυτήν τη θερμοκρασία.

Καρβίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται, επίσης, και με τη μορφή φυλλιδίων, όπως εκείνα των μαρμαρυγιών. Ωστόσο, οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι κατώτερες εκείνων των ινών SiC .

Είναι δυνατή η δημιουργία μονοκρυσταλλικών ινών αλούμινας (AlP_3) διαμέτρου $250\ \mu\text{m}$, με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Χάριν της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800°C . Ωστόσο, οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες και η παραμικρή φθορά της επιφάνειάς τους, οδηγεί σε αστοχία.

7. ΤΡΙΧΙΤΕΣ (whiskers)

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι οι οποίοι παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Λόγω της μεθόδου παραγωγής τους, οι τριχίτες δεν έχουν παρά μόνο μίαν αξονική διαταραχή κοχλία και, κατά συνέπεια, παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Η διάμετρός τους είναι συνήθως $1\ \mu\text{m}$, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει ως μερικά χιλιοστά. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων.

Σε βιομηχανική κλίμακα, είναι δύσκολη η παραγωγή τριχιτών, λόγω της αδυναμίας πλήρους και ακριβούς ελέγχου των συνθηκών παραγωγής, προϋποθέσεις απαραίτητες για την παραγωγή τριχιτών σταθερής διαμέτρου. Με την αύξηση της διαμέτρου των τριχιτών, πάνω από μερικά μικρόμετρα, η εξωτερική επιφάνεια του τριχίτη παύει να είναι λεία. Οι σχηματιζόμενες επιφανειακές ανωμαλίες δρουν ως ζώνες συγκέντρωσης τάσεων, με αποτέλεσμα τη μείωση της μηχανικής αντοχής του τριχίτη.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου.

Πίνακας 4. Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από Sic και Al₂O₃.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	Sic _{ΙΝΑ}	Sic _{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}	Al ₂ O ₃ _{ΙΝΑ}	Al ₂ O ₃ _{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm ³)	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	900	1600	800	1300

2. 2. 2. Μήτρες (matrix)

Αν οι ίνες συνεισφέρουν στην υψηλή μηχανική αντοχή του συνθέτου, η μήτρα την εξασφαλίζει. Οι μηχανικές τάσεις που ασκούνται στο σύνθετο υλικό μεταφέρονται μέσω της μήτρας προς τις ίνες. Επιπλέον, η διάδοση των ρωγμών, που ξεκινούν από σπασμένες ίνες, ανακόπτεται από το υλικό της μήτρας.

Για να ικανοποιεί το ρόλο με τον οποίο είναι επιφορτισμένη, η μήτρα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και, φυσικά, θα πρέπει το σημείο τήξης της να είναι υψηλότερο της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας του συνθέτου υλικού. Οι πιο πάνω ιδιότητες θα πρέπει να παρουσιάζουν "συμβατότητα" με αυτές των ενισχυτικών ινών. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας-μήτρας.

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι χρησιμοποιούμενες μήτρες μπορεί να είναι οργανικές, μεταλλικές ή κεραμικές.

1. ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

α. Θερμοπλαστικές. Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά θερμοπλαστικών μητρών, χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κλπ), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

β. Θερμοσκληρυνόμενες. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τέτοιες μήτρες είναι:

- Πολυεστερικές ρητίνες, που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- Εποξυδικές ρητίνες, με καλύτερες ιδιότητες από τις προηγούμενες και με χρήση στην αεροναυπηγική. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι 200 °C.

- Φαινολικές ρητίνες. Αυτές έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες, ωστόσο η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400 °C.

2. ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μητρών είναι περίπου 300 °C, ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία υψηλότερη των 500 °C. Επομένως, για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μητρών.

Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα. Στον πίνακα 5 φαίνονται τα σπουδαιότερα από αυτά.

Οι τεχνικές παραγωγής συνθέτων υλικών με μεταλλική μήτρα αναπτύσσονται στο οικείο κεφάλαιο (2.3).

3. ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Τα κεραμικά υλικά, ως γνωστό, είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης σπιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και τη χημική προσβολή, με αποτέλεσμα να αποτελούν υλικά μεγάλου ενδιαφέροντος στην περιοχή των συνθέτων υλικών.

Οι ίνες στην περίπτωση κεραμικής μήτρας αποβλέπουν, αφενός μεν, στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς, αφετέρου δε, στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής.

Η βελτίωση της αντοχής είναι συνάρτηση του ποσοστού των περιεχομένων ινών. Ολκιμες ίνες, μικρού μήκους (π.χ. Mo, Ni) βελτιώνουν την αντοχή της μήτρας (Al_2O_3 , MgO), ακόμα και σε μικρά κατόγκον ποσοστά. Αντίθετα, για να επιτευχθεί η ίδια ενίσχυση του υλικού, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνταν ψαθυρές ίνες μεγάλου μήκους, το κατόγκον ποσοστό ενισχυτικού θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο.

Το σημαντικότερο πρόβλημα που τίθεται από τη χρήση κεραμικών μητρών αφορά τη συνάφεια ινών-μήτρας και προέρχεται από τις μεγάλες

Πίνακας 5. Σύγκριση μεταλλικών – οργανικών μητρών. Συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πρώτων

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών. • Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου. • Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου. • Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου, για ειδικές εφαρμογές. • Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση). 	<ul style="list-style-type: none"> • Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών. • Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής. • Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO_2 σε μήτρα Al). • Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας. • Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.

διαφορές του συντελεστή γραμμικής διαστολής μεταξύ της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι **μήτρες άνθρακα**. Η παραγωγή τους, όπως και η παραγωγή ανθρακονημάτων, στηρίζεται στην πυρόλυση οργανικών μητρώων σε υψηλή θερμοκρασία. Η δομή τους χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη κόκκων πυρολιθικού άνθρακα, οι οποίοι αποτίθενται στις ίνες εν θερμώ, εξασφαλίζοντας έτσι καλή πρόσφυση ίνας-μήτρας και πληρώνοντας τα μεταξύ τους κενά. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται σύνθετο υλικό με πυκνότητα που προσεγγίζει αυτήν του συμπαγούς άνθρακα.

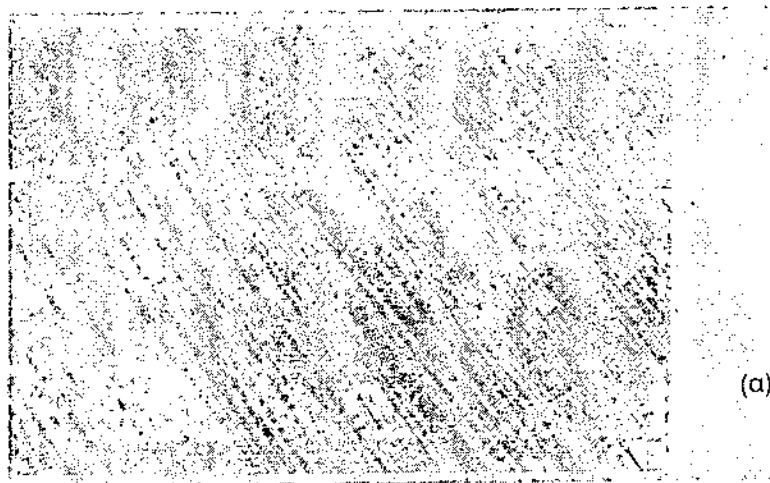
Ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οικιασκαυές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

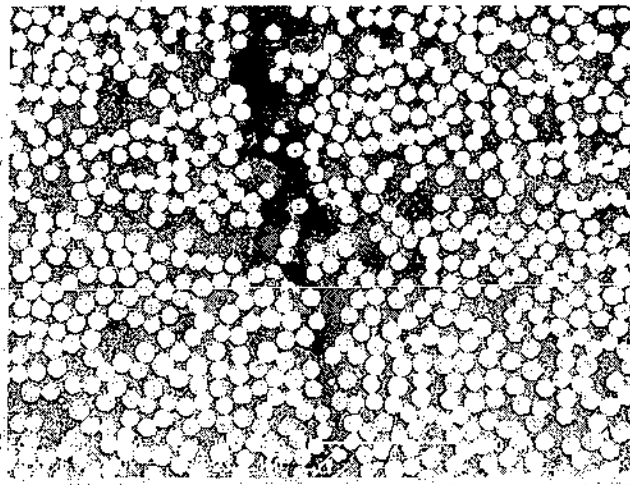
2. 2. 3. Επιλογή ενισχυτικών ινών και μήτρας

Για τον ορθό σχεδιασμό του συνθέτου υλικού, εκτός από την επιλογή των υλικών ενίσχυσης και μήτρας, θα πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψιν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών, ο προσανατολισμός τους, η επί τοις εκατό κατόγκον αναλογία τους στο σύνθετο υλικό, καθώς επίσης και η ποιότητα της διεπιφάνειας ινών-μήτρας.

1. Γεωμετρία ινών

ο λόγος (s) (aspect ratio) του μήκους (l) προς την ακτίνα (r) των ινών είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας και αποτελεί το κριτήριο για το χαρακτηρισμό τους ως μακριές-συνεχείς ή κοντές ασυνεχείς (σχήμα 7). Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες.





Σχήμα 7. Ίνες γυαλιού σε εποξειδική μήτρα: (α) Διαμήκης τομή (x37)
(β) Εγκάρσια τομή(x90)

Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με το μήκος τους και τη μείωση της διαμέτρου τους. Για ασυνεχή ίνα, υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος (l_c) για δεδομένη διάμετρο ίνας (d), το οποίο ορίζεται από τη σχέση 1

$$l_c = \frac{\sigma_i d}{2 \tau_i}$$

Όπου σ_i αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και τ_i η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας.

Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου μήκους (l_c), η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή. Αν είναι μεγαλύτερο ($>15l_c$) η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

2. Ποσοστό ινών

Αύξηση της κατ'όγκον αναλογίας των περιεχομένων ινών, προκαλεί αύξηση της αντοχής και της στιβαρότητας του συνθέτου. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα κατασκευής του συνθέτου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

Πολλές φορές, για την καλύτερη ενίσχυση της μήτρας δεν χρησιμοποιείται ένας, μόνον, τύπος ινών, αλλά μίγμα δύο ή περισσότερων τύπων. Τα παραγόμενα ονομάζονται υβριδικά σύνθετα (hybrid composites). Ίνες Kevlar αναμιγνυόμενες με ανθρακονήματα βελτιώνουν τη στιβαρότητα ενός δύσκαμπτου συνθέτου, ενώ αναμιγνυόμενες με υαλονήματα βελτιώνουν τη δυσκαμπτότητά του. Υβριδικά σύνθετα ειδικών χρήσεων μπορούν να παραχθούν με τον έλεγχο του ποσοστού και του προσανατολισμού κάθε τύπου ινών.

3. Προσανατολισμός ινών

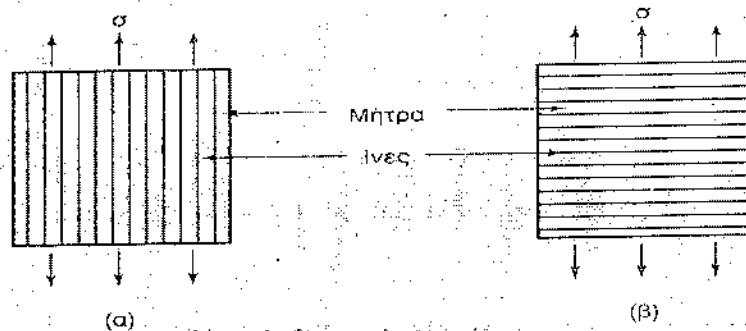
Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του συνθέτου να είναι όσον το δυνατόν ισότροπη.

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες, για παράδειγμα, παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία. Η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Σε μια δοκιμή εφελκυσμού, όταν οι ίνες είναι παράλληλες της φόρτισης, (σχήμα III.8α) η παραμόρφωση των ινών (ϵ_f) ισούται με αυτήν της μήτρας (ϵ_m) και του συνθέτου υλικού (ϵ_c). Πρόκειται για περίπτωση προσανατολισμού υψηλού μέτρου ελαστικότητας, για την οποία ισχύει η ισότητα:

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m \quad (\text{ίσες παραμορφώσεις}) \quad (2)$$

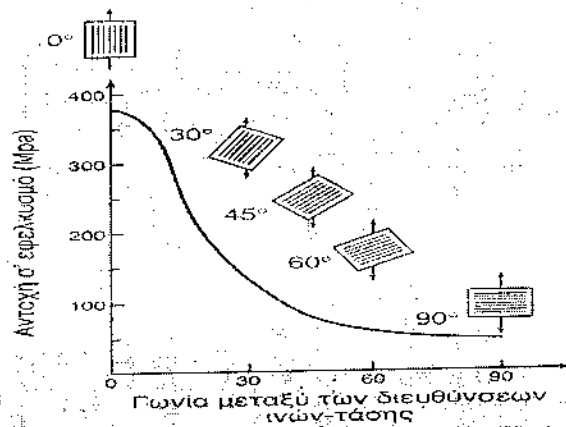
Όταν οι ίνες είναι κάθετες στη διεύθυνση φόρτισης (σχήμα 8β), τότε το φορτίο που προσλαμβάνει η ενίσχυση (σ_f) ισούται με αυτό που παίρνει η μήτρα (σ_m) και το σύνθετο υλικό (σ_c). Πρόκειται για περίπτωση προσανατολισμού χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, για την οποία ισχύει η ισότητα:

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad (\text{ίσα φορτία})$$



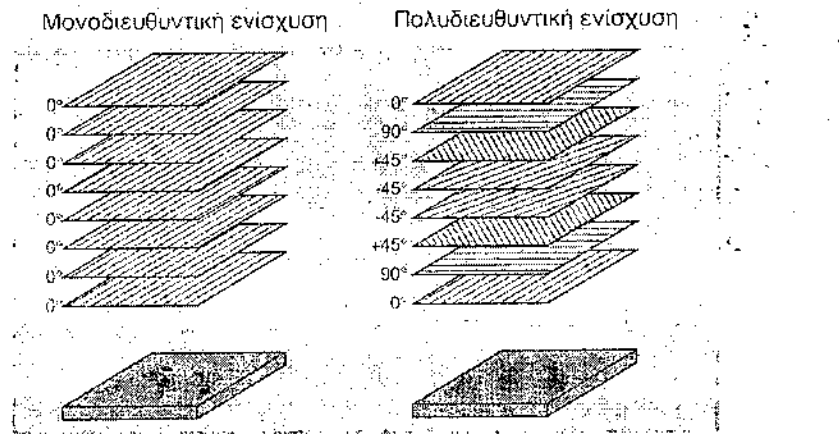
Σχήμα 8. (α) Φόρτιση παράλληλα στη διεύθυνση των ινών. (β) Φόρτιση κάθετα στη διεύθυνση των ινών.

Γενικά, για το σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη σιβαρότητα, -μέτρο της είναι το E_c - και αντοχή, -μέτρο της το σ_{TS} - επιτυγχάνεται, εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών (σχήμα 9).



Σχήμα 9. Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό σύνθετου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού.

Συνήθως ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Αν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο είναι αν ισότροπο (σχήμα III.10α). Ισότροπο σύνθετο λαμβάνεται στην περίπτωση κατά την οποία η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού (σχήμα 10β).



Σχήμα 10. Πολυστρωματικά σύνθετα με ενίσχυση στρώσεων μονοδιευθυντικών ινών: (α) ανισότροπο και (β) ισότροπο σύνθετο.

Στην ονομασία του πολυστρωματικού συνθέτου θα πρέπει να αναφέρεται η διαδοχή προσανατολισμών. Για παράδειγμα, ένα σύνθετο $[30/90_2/0/-45]_s$, αποτελείται από 5 στρώσεις. Μετρούμενες από την κάτω επιφάνεια του συνθέτου, η ενίσχυση της πρώτης στρώσης σχηματίζει γωνία 30° με τον διαμήκη άξονα του συνθέτου, η ενίσχυση της δεύτερης και της τρίτης, γωνία 90°, οι μονοδιευθυντικές ίνες της τέταρτης έχουν τη διεύθυνση του διαμήκη άξονα και τέλος, αυτές της πέμπτης στρώσης σχηματίζουν γωνία -45° (ή 315°).

Το σύνθετο του σχήματος III.10β χαρακτηρίζεται ως συμμετρικό σύνθετο και ονομάζεται $[0/90/45/-45]_s$.

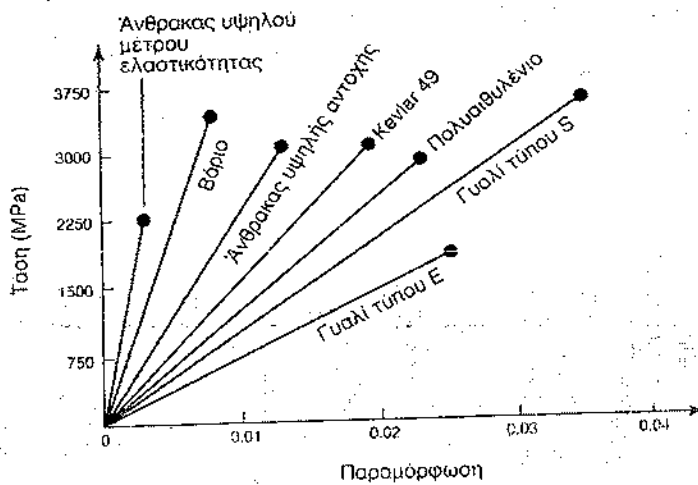
4. Ιδιότητες ινών

Για τη σύγκριση διαφόρων ινών ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες (σχήμα III.11 α), συνήθως χρησιμοποιούνται και τα ανοιγμένα μεγέθη του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής. Η αναγωγή γίνεται ως προς την πυκνότητα των ινών και τα προκύπτοντα μεγέθη καλούνται ειδική αντοχή (specific strength) και ειδικό μέτρο ελαστικότητας (specific modulus) (σχήμα 11β).

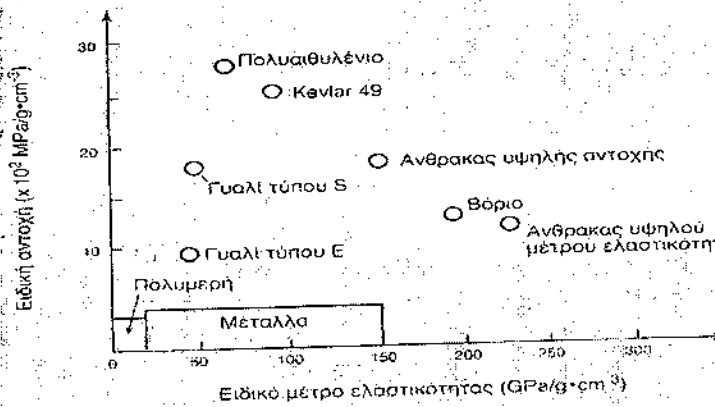
Τη μέγιστη ειδική αντοχή (σ_{TS}/ρ) παρουσιάζουν οι ίνες πολυαιθυλενίου και Kevlar, ενώ το μέγιστο ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) παρουσιάζουν οι ίνες C και B, λόγω του μικρού ατομικού αριθμού και της ύπαρξης ομοιοπολικών δεσμών.

Το πολυαιθυλένιο παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο σ/ρ σε σχέση με το Kevlar, λόγω της μικρότερης πυκνότητάς του, αλλά υπάρχει πρόβλημα για τη χρήση του σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300 °C.

Τα γυαλιά παρουσιάζουν καλή αντοχή (σ_{TS}) και υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), αλλά έχουν συγκριτικά μεγάλη πυκνότητα, με αποτέλεσμα οι ίνες γυαλιού να εμφανίζουν χαμηλότερη ειδική αντοχή από άλλες ίνες.



(a)



(β)

ΣΧΗΜΑ 11. (α) Καμπύλες εφελκυσμού (τάσεων-παραμορφώσεων) χαρακτηριστικών τύπων ενισχυτικών ινών. (β) Σύγκριση διαφόρων ινών ως προς την ειδική αντοχή και το ειδικό μέτρο ελαστικότητάς τους.

5. Συνάφεια ινών-μήτρας

Η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την καλή λειτουργία του συνθέτου. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του συνθέτου. Κακή συνάφεια έχει, εξάλλου, σαν αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull-out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού.

Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας-ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό:

- Οι ίνες γυαλιού επενδύονται με ουσίες που εξασφαλίζουν, αφενός μεν, τη συνάφεια με τη μήτρα, αφετέρου δε την αντίσταση του συνθέτου στην υγρασία.
- Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα ή με Νί, όταν χρησιμοποιούνται σε μεταλλικές

μήτρες (Ag, Al).

- Οι ίνες Β, όταν ενισχύουν μήτρες αλουμινίου θα πρέπει να επικαλύπτονται με ΒΝ ή SiC. Ίνες βορίου επικαλυμένες με καρβίδιο του πυριτίου καλούνται Borsic.

6. Επιλογή υλικών

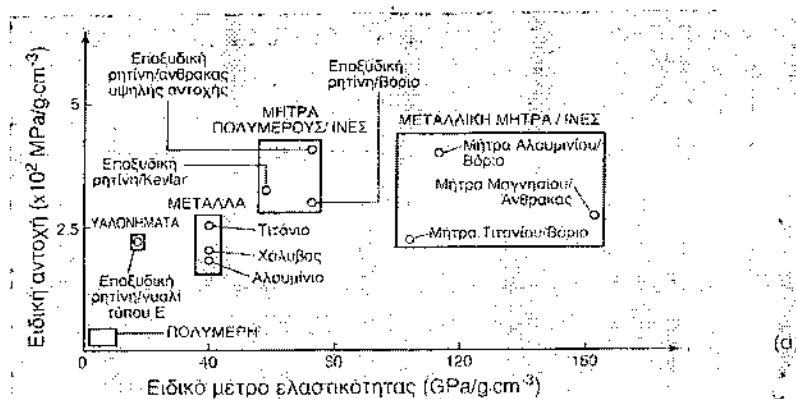
Βασικό στοιχείο του ορθού σχεδιασμού του συνθέτου αποτελεί η επιλογή του κατάλληλου τύπου ινών για την ενίσχυση δεδομένου τύπου μήτρας.

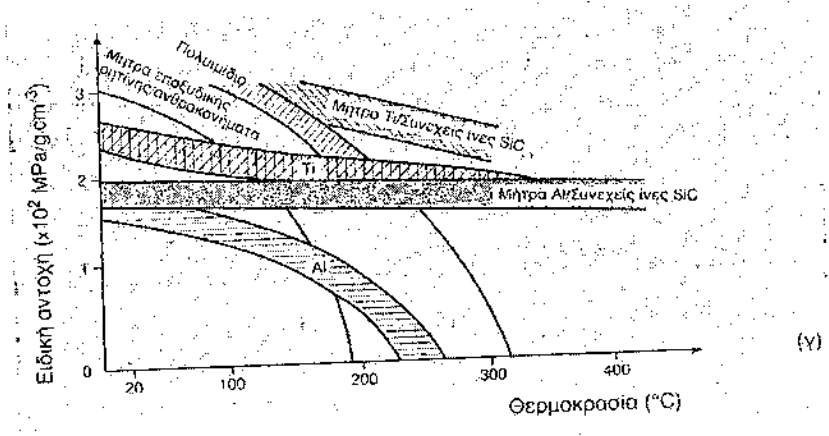
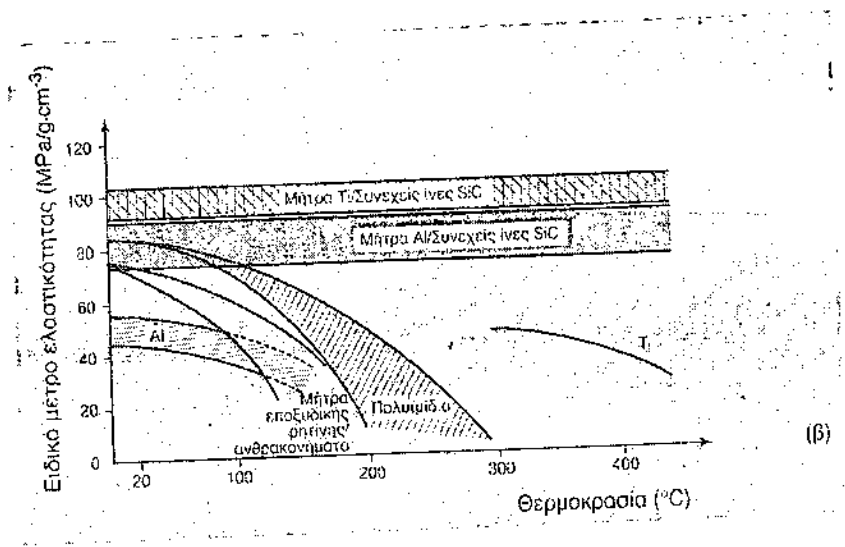
Στο σχήμα III.12α φαίνονται οι περιοχές ειδικής αντοχής και ειδικού μέτρου ελαστικότητας για διάφορα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών. Οι τιμές E/ρ και σ_{ts}/ρ συγκρινόμενες με αυτές των πολυμερών και των μετάλλων υποδεικνύουν τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών.

Τόσο η τιμή του ειδικού μέτρου ελαστικότητας, όσο και αυτή της ειδικής αντοχής των συνθέτων, μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στα σχήματα III.12β και III.12γ αντιστοίχως. Η εξάρτηση των μεγεθών αυτών από τη θερμοκρασία θέτει περιορισμούς στη χρήση των συνθέτων υλικών.

Στο σχήμα III.13 φαίνονται οι μικροδομές χαρακτηριστικών τύπων συνθέτων υλικών με ενίσχυση ινών.

Στους πίνακες 6, 7 και 8 που ακολουθούν, δίδονται παραδείγματα των συνηθέστερων σύνθετων υλικών, οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές που βρίσκουν στην κατασκευαστική βιομηχανία.





ΣΧΗΜΑ III.12. (α) Περιοχές ειδικής αντοχής και ειδικού μέτρου ελαστικότητας χαρακτηριστικών συνθετών υλικών με ενίσχυση ινών. (β) Μεταβολή του ειδικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, συνθετών υλικών με ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών. (γ) Μεταβολή της ειδικής αντοχής συναρτήσει της θερμοκρασίας, συνθετών υλικών με ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών.



ΣΧΗΜΑ III.13. Ηλεκτρονικές μικρογραφίες χαρακτηριστικών συνθέτων: (α) Ινες Al_2O_3 σε μήτρα αλουμινίου (x700). (β) Ινες άνθρακα σε μήτρα αλουμινίου (x350). (γ) Ινες γυαλιού σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης (x700).

Στους πίνακες III.6,7,8 που ακολουθούν, δίδονται παραδείγματα συνηθέστερων συνθέτων υλικών, οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές που βρίσκουν στην κατασκευαστική βιομηχανία

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ. 6. Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών οργανικής μήτρας.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέττες tennis, μπαστούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος).
Πολυεστερική	Γραφίτη	Αεροναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση. Αθλητικός εξοπλισμός.
Πολυμερική	Γυαλιού	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ. 7. Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic Al ₂ O ₃ SiC Γραφίτη	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών. Εμβόλα μηχανών diesel. Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων. Ιστοί κεραίων τηλεσκοπίου Hubble.
Κράματων Cu	SiC	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC B ₄ N	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ. 8. Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ανθρακα	Ανθρακα	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επιτρεπτή η λειτουργία ως τους 3000 °C). Δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα.
Al ₂ O ₃ , SiC, ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ και κεραμικά γυαλιά	Al ₂ O ₃ SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομόνωσης.

2.3. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

Συνήθως, η μορφοποίηση συνθέτων υλικών με ίνες περιλαμβάνει τρία διακεκριμένα στάδια, την παραγωγή των ινών, τη διάταξη - διεύθυνση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα και την εισαγωγή των ινών στη μήτρα. Το πρώτο στάδιο έχει ήδη αναφερθεί.

Σε δεύτερο στάδιο, οι εξαιρετικά λεπτές ίνες του πρώτου σταδίου, ομαδοποιημένες ανά 100 ως 100.000, σχηματίζουν με ή χωρίς περιστροφή, ενισχυτικά νήματα ή πλεξίδες (yarn, tow ή roving).

Συνεχείς ίνες, μεγάλου μήκους μπορούν να προστεθούν είτε ως ενισχυτικές στρώσεις διαφόρων προσανατολισμών (mats), είτε ως διαδιάστατες και τρισδιάστατες πλέξεις (fabrics). Η παραγωγή συνθέτων με μονοδιευθυντικές ίνες επιβάλλει την εκ των προτέρων διεύθυνση των ινών σε ταινίες με πάχος, το πάχος μιας ίνας και με καθορισμένη τη μεταξύ τους απόσταση.

Οι ίνες με μήκος μικρότερο του 1 cm αναμιγνύονται με το υλικό της μήτρας το οποίο βρίσκεται σε τετηκυία κατάσταση ή σε κατάσταση αυξημένης πλαστικότητας. Το εύπλαστο μίγμα ινών - μήτρας μορφοποιείται με κλασικές τεχνικές, όπως η χύτευση και ο ψεκασμός. Σε αυτήν την περίπτωση, η ενίσχυση του παραγομένου συνθέτου έχει τυχαίο προσανατολισμό. Οι μέθοδοι μορφοποίησης συνθέτων υλικών μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες με βάση το υλικό της μήτρας.

2. 3. 1. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

(α) Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτων

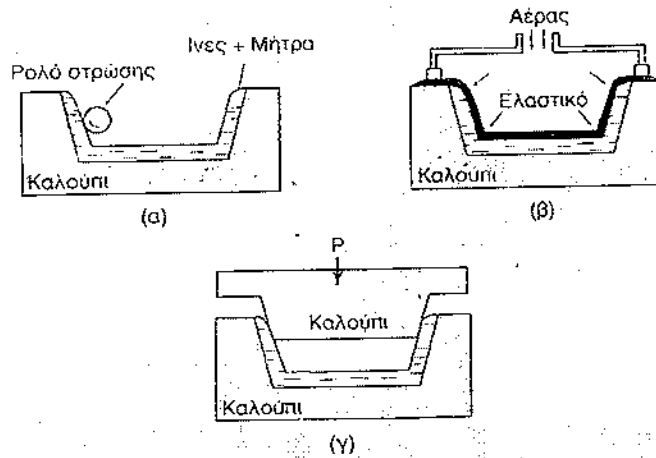
- **Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)**

Αποτελεί την απλούστερη τεχνική παραγωγής ενός συνθέτου, αλλά ταυτόχρονα είναι αργή και επίπονη. Οι ίνες, με μορφή πλεγμάτων, τοποθετούνται στο καλούπι σε στρώσεις. Η πολυμερική ρητίνη, αφού αναμιχθεί με τους κατάλληλους καταλύτες και επιταχυντές, απλώνεται πάνω στην ενίσχυση με απλή έγχυση (pouring), επάλειψη (brushing) ή Ψεκασμό(spraying). Εν συνεχεία, η ελεύθερη επιφάνεια του συνθέτου υφίσταται συμπίεση με ρολό, ώστε να επιτευχθεί καλή επαφή ινών-μήτρας και να εξαλειφθεί το εναπομείναν πορώδες. Προκειμένου να αυξηθεί το πάχος των τοιχωμάτων του αντικειμένου, επαναλαμβάνεται η περιγραφείσα διαδικασία (σχήμα III.21α). Ακολουθεί ξήρανση.

- **Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag).** Αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου. Για την καλύτερη στρώση της οργανικής μήτρας, χρησιμοποιείται αέριο υπό πίεση. Ακολουθεί ξήρανση (σχήμα III.21β).

- **Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding).**

Η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με το "κλείσιμο" ενός διαιρετού καλουπιού (σχήμα III.21γ).



ΣΧΗΜΑ ΙΙΙ.21. Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτων: χειροποίητη στρώση (α), χύτευση θαλάμου πίεσης (β) και χύτευση σε διαίρετο καλούπι (γ).

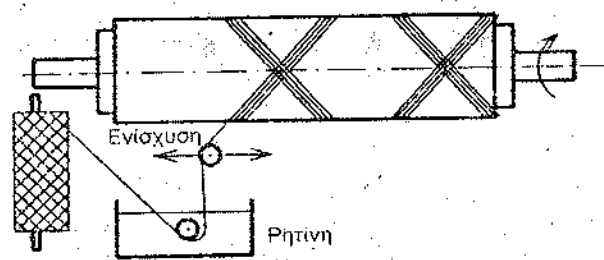
(β) Συνεχής μορφοποίηση συνθέτων

Με τις τεχνικές συνεχούς μορφοποίησης, μπορεί να ληφθεί σύνθετο υλικό απλής γεωμετρίας και μεγάλου μήκους (νήμα, μπάρα, σωλήνας, πλάκα, φύλλο).

- **Περιέλιξη νήματος (filament winding)**

Αποτελεί σημαντική τεχνική για την παραγωγή κοίλων κυλίνδρων, υψηλών προδιαγραφών. Οι ενισχυτικές ίνες μετά την εμβάπτισή τους σε λουτρό ρητίνης, περιτυλίγονται σε καλούπι του επιθυμητού σχήματος (σχήμα ΙΙΙ.22). Πολλές φορές ο εμποτισμός σε ρητίνη γίνεται ταυτόχρονα ή έπεται της στρώσης του ενισχυτικού. Ακολουθεί ξήρανση στον αέρα ή σε κλίβανο.

Ο ισχυρός προσανατολισμός της ενίσχυσης δίνει κελύφη συνθέτων υλικών, με υψηλή μηχανική αντοχή. Η τεχνική βρίσκει εφαρμογή στην κατασκευή δεξαμενών καυσίμων και χημικών, αγωγών υψηλών πιέσεων, κλπ.



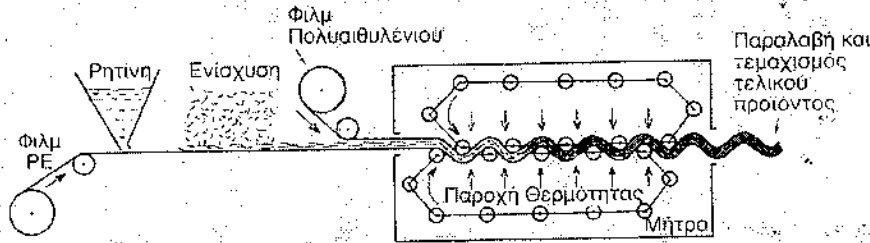
ΣΧΗΜΑ ΙΙΙ.22. Κατασκευή συνθέτου υλικού με τη μέθοδο περιτύλιξης νήματος.

- **Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)** Είναι μια νέα σχετικά τεχνική, με μεγάλη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα προϊόντα έχουν μεγάλες διαστάσεις, αλλά και υψηλή ομοιογένεια ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μικρού μήκους (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης, το οποίο κινείται σε υμένιο

πολυαιθυλενίου. Ένα δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται πάνω στο πρώτο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα sandwich, μέσα στο οποίο έχουν εγκλωβιστεί οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού (σχήμα 111.23).

Το σύνθετο τυλίγεται σε ρολά και αφήνεται να "ωριμάσει" από μία έως τέσσερις ημέρες, ώστε να αναπτυχθεί καλή συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας. Το έλασμα του συνθέτου κόβεται στο επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό μεταλλικό καλούπι (149 °C). Με την εφαρμογή υδραυλικής πίεσης, το αρχικό έλασμα μορφοποιείται σε τελικό προϊόν.



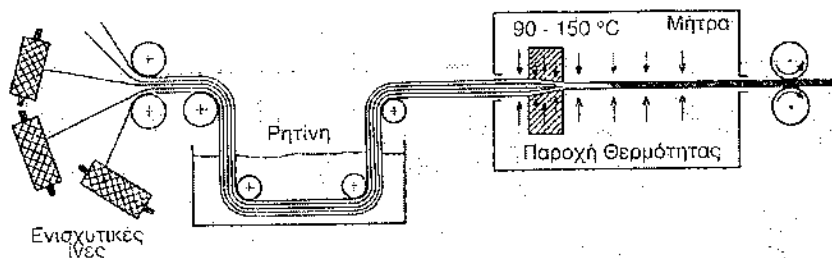
ΣΧΗΜΑ III.23. Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος.

- **Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)**

Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται σταθερή διατομή: σωλήνες, δοκοί, αγωγοί, κλπ.

Κατά τρόπο συνεχή, ίνες μεγάλου μήκους, διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους, εμβαπτίζονται σε λουτρό ρητίνης και οδηγούνται σε θερμαινόμενη μήτρα χάλυβα, η οποία καθορίζει και τη διατομή του τελικού προϊόντος (σχήμα III.24).

Το προϊόν έχει υψηλή μηχανική αντοχή, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ινών και του ισχυρού προσανατολισμού τους, παράλληλα στον επιμήκη άξονα του προϊόντος.



ΣΧΗΜΑ III.24. Μορφοποίηση με εμβάπτιση.

2. 3. 2. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας

Η μορφοποίηση συνθέτου υλικού με μεταλλική μήτρα είναι δυσκολότερη τεχνικά και ακριβότερη, από τη μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανική κλίμακα είναι:

{α} Συν-διέλαση (co-extrusion)

Όταν η ολκιμότητα μήτρας και ινών είναι παρόμοιες, μπορούμε να εφαρμόσουμε την τεχνική της ταυτόχρονης διέλασης. Επειδή στις περισσότερες των περιπτώσεων οι ίνες έχουν ψαθυρή συμπεριφορά, είναι δύσκολη η πλαστική τους διαμόρφωση, ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, αρκετά οξειδία είναι όλκιμα εν θερμώ. Είναι έτσι δυνατή η παραγωγή συνθέτων υλικών με μήτρα νιόβιου ή τανταλίου και ενίσχυση ινών μαγνησίας (MgO), οξειδίου του θορίου (ThO) και ζιρκονίας (ZrO₂) Ακόμα κι αν η βελτίωση που προσφέρουν οι ίνες αυτές στη μηχανική αντοχή της μήτρας δεν είναι θεαματική, τα παραγόμενα σύνθετα έχουν καλύτερη στιβαρότητα και χαμηλότερη πυκνότητα.

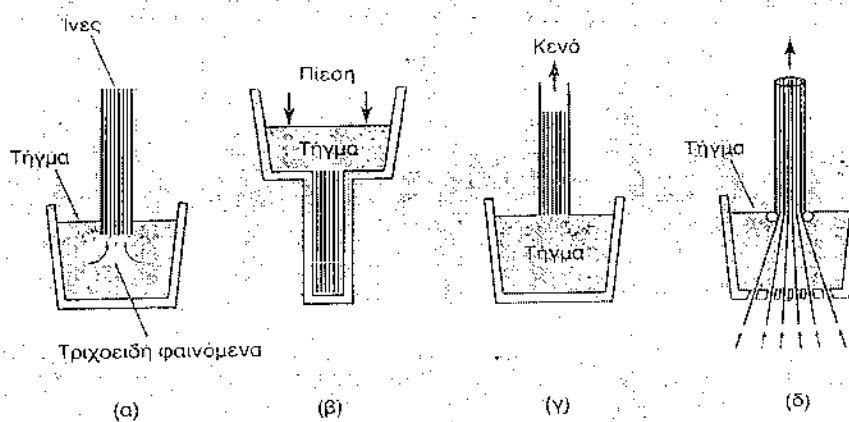
{β} Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)

Η μεταλλική μήτρα εισάγεται σε τετηκυία κατάσταση στο σύστημα κατάλληλα διευθετημένων ινών ή τριχιτών (σχήμα III.25). Η κατάλληλη διαβροχή των ινών από το τήγμα της μήτρας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια φαινομένων τριχοειδών αγγείων (capillary rise), πίεσης βαρύτητας (pressure casting), εφαρμοζόμενου κενού (vacuum infiltration) ή, τέλος, με συνεχή χύτευση (continuous casting).

Η τεχνική αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η μήτρα αντιδρά με το υλικό των ινών στη θερμοκρασία της χύτευσης, ενώ παράλληλα το τήγμα θα πρέπει να έχει ρευστότητα που να επιτρέπει την καλή διείσδυσή του μεταξύ των ινών. Η τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως για την ενίσχυση μητρών αλουμινίου ή αργύρου με τριχίτες ζαφειριού και την ενίσχυση κραμάτων αλουμινίου με ίνες άνθρακα.

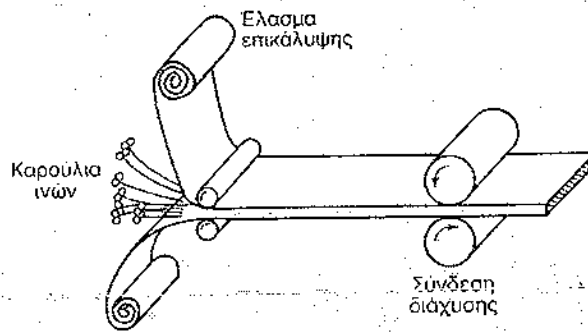
{γ} Συμπύεση σε στερεή κατάσταση

Συνεχείς ίνες, υπό τη μορφή ταινιών, συμπιέζονται μεταξύ δύο μεταλλικών ελασμάτων (σχήμα III.26).



ΣΧΗΜΑ III.25. Μορφοποίηση με χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων (α), πίεσης βαρύτητας (β), εφαρμογής κενού (γ) και μορφοποίηση με συνεχή χύτευση (δ).

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται συγκόλληση των ελασμάτων και καλή πρόσφυση ινών- μήτρας, με την ανάπτυξη δεσμών λόγω διάχυσης (diffusion bonding).



ΣΧΗΜΑ III.26. Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση.

{δ} Απόθεση υλικού μήτρας

Το υλικό της μήτρας μπορεί να αποτεθεί στις ίνες, είτε με χημική εναπόθεση ατμών (CVD), είτε με ηλεκτραπόθεση (electrodeposition).

Με την τεχνική CVD αποτίθεται αλουμίνιο και νικέλιο σε ίνες άνθρακα. Με ηλεκτραπόθεση από οργανικά διαλύματα αλάτων του αλουμινίου, και υδατικά διαλύματα χαλκού και νικελίου, ενισχυτικές ίνες έχουν επιστρωθεί με αλουμίνιο, χαλκό και νικέλιο, αντιστοίχως. Εν συνεχεία, οι επικαλυμμένες ίνες υποβάλλονται σε έψηση, η οποία συμβάλλει στην καλύτερη διείσδυση της μήτρας μεταξύ των ινών και η οποία, με την τεχνική χύτευσης δε θα ήταν δυνατή.

2. 3. 3. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας

Οι τεχνικές μορφοποίησης συνθέτων κεραμικής μήτρας στηρίζονται στις τεχνικές μορφοποίησης κεραμικών υλικών και, κύρια, στη διαδικασία έψησης. Η κεραμική σκόνη (μήτρα), το συνδετικό υλικό, και οι ίνες τοποθετούνται σε κατάλληλο υποδοχέα. Το συνδετικό εξασφαλίζει την καλή πρόσφυση ινών-κεραμικής σκόνης. Στη συνέχεια, το μίγμα υποβάλλεται σε έψηση σε υψηλή θερμοκρασία.

Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η *in situ* αντίδραση ινών άνθρακα και πυριτίου και η παραγωγή συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας με ενίσχυση ινών SiC. Τέλος, είναι δυνατή η παραγωγή συνθέτων υλικών με μήτρα νιτριδίου του πυριτίου, αν σε ίνες βολφραμίου, καρβιδίου του πυριτίου ή άνθρακα, αποτεθεί πυρίτιο και, εν συνεχεία, πραγματοποιηθεί κατεργασία σε ατμόσφαιρα αζώτου στους 1450 °C. Η εναζώτωση του πυριτίου συνοδεύεται από αύξηση του όγκου, η οποία οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας του συνθέτου.

Στην περίπτωση υαλωδών κεραμικών, οι ενισχυτικές ίνες μπορούν να προστεθούν στη μήτρα ενόσω αυτή βρίσκεται σε υγρή κατάσταση.

Παρόμοιες είναι και οι τεχνικές που εφαρμόζονται στην περίπτωση μήτρας από άνθρακα.

3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

3. 1. ΓΕΝΙΚΑ

Γα σύνθετα υλικά στα οποία το υλικό ενίσχυσης έχει μορφή σωματιδίων, σφαιρικού συνήθως σχήματος, μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες με βάση το μέγεθος αυτών:

- Σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων μεγάλου μεγέθους (particulate composites). Τα σωματίδια έχουν διάμετρο λίγων μm και περιέχονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25%, συνήθως η κατ'όγκο συγκέντρωσή τους είναι 60-90%.
- Σύνθετα με ενίσχυση μικρών σωματιδίων σε διασπορά (dispersion strengthened metals). Η ενισχυτική φάση, -συνήθως πρόκειται για οξειδία,- περιέχεται στο σύνθετο σε συγκεντρώσεις μικρότερες από 15% κ.ο. Η διάμετρος των σωματιδίων ποικίλει μεταξύ 0,01 και 0,1 μm . Η ισχυροποίηση της μήτρας επιτυγχάνεται με την παρεμπόδιση της κίνησης των διαταραχών, λόγω της παρουσίας των σωματιδίων ενίσχυσης.

Γενικά, τα σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων είναι λιγότερο ανθεκτικά από τα σύνθετα με ενίσχυση ινών, διότι η συμβολή των σωματιδίων στην αντοχή του συνθέτου υλικού είναι μικρότερη αυτής των ινών. Είναι χαμηλότερου κόστους σε σχέση με τα σύνθετα με ίνες και έχουν καλύτερη αντοχή σε φθορά-τριβή λόγω της παρουσίας σκληρών σωματιδίων. Στον πίνακα III.10 φαίνονται χαρακτηριστικοί αντιπρόσωποι συνθέτων με ενίσχυση σωματιδίων και οι κυριότερες εφαρμογές τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ III.10. Παραδείγματα και εφαρμογές των κυριότερων συνθέτων υλικών με ενίσχυση σωματιδίων.

ΜΗΤΡΑ	ΕΝΙΣΧΥΣΗ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ag	CdO	Ηλεκτρικές επαφές υλικών.
Al	Al ₂ O ₃	Πυρηνικοί αντιδραστήρες.
Be	BeO	Αεροπορικές και πυρηνικές εφαρμογές.
Co	ThO ₂ , Y ₂ O ₃	Μαγνητικό υλικό αντοχής σε ερπυσμό.
Ni-20% Cr	ThO ₂	Μέρη κινητήρων μηχανών.
Pb	PbO	Πλέγματα μπαταριών.
Pt	ThO ₂	Νήματα, μέρη ηλεκτρικών συσκευών.
W	ThO ₂ , ZrO ₂	Νήματα, θερμαντικά σώματα.
Co	WC	Αντιτριβικές εφαρμογές, κοπτικά εργαλεία

3.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

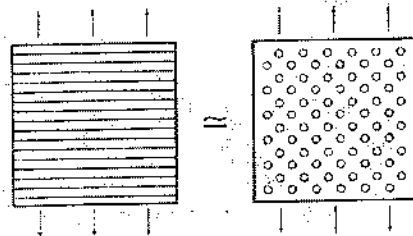
Στην περίπτωση των συνθέτων υλικών με ενίσχυση σωματιδίων, ο κανόνας των μιγμάτων εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της πυκνότητας του συνθέτου υλικού, αλλά όχι και για τις μηχανικές του ιδιότητες, δηλαδή, ισχύει μόνο ότι:

$$P_c = \sum v_i \rho_i$$

όπου ρ_i η πυκνότητα του συστατικού i και

v_i το κατ'όγκον ποσοστό του συστατικού i .

Μακροσκοπικά, τα σύνθετα υλικά με διασπορά σωματιδίων συμπεριφέρονται ως ισότροπα υλικά. Κατά τον εφελκυσμό, η συμπεριφορά τους είναι ισοδύναμη εκείνης των συνθέτων με ενίσχυση ινών, όταν τα τελευταία εφελκύνονται σε διευθύνσεις κάθετες στη διεύθυνση των ινών (σχήμα III.27).

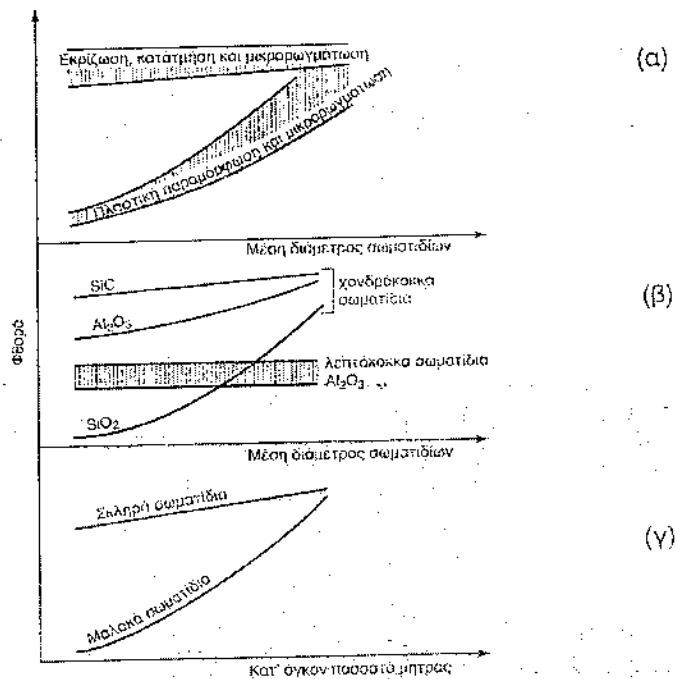


ΣΧΗΜΑ III.27. Ισοδύναμη συμπεριφορά σε εφέλκυσμό, συνθέτου υλικού με ίνες και σωματίδια.

Από τις πιο σημαντικές εφαρμογές που βρίσκουν τα σύνθετα με διασπορά σωματιδίων είναι η χρήση τους για αντιτριβική προστασία. Οι μηχανισμοί φθοράς τους (abrasive wear) είναι συνάρτηση της σκληρότητας και της διαμέτρου των σωματιδίων ενίσχυσης, καθώς επίσης και των χαρακτηριστικών της μήτρας.

Η παρουσία σκληρών σωματιδίων προκαλεί, σε μικροσκοπική κλίμακα, κοπή (microcutting), απόξεση (microploughing) και ρωγμάτωση (microcracking) του συνθέτου, ενώ μαλακότερα σωματίδια ενίσχυσης προκαλούν, κυρίως, πλαστική παραμόρφωση και μικρορωγμάτωση (σχήμα III.28α).

Αύξηση της διαμέτρου των μαλακότερων σωματιδίων ενίσχυσης οδηγεί σε αύξηση της φθοράς του υλικού, είτε λόγω φαινομένων πλαστικής παραμόρφωσης της μήτρας και αποσύνδεσης-εκρίζωσης του σωματιδίου από τη μήτρα, είτε λόγω εμφάνισης μικρορωγμών στα σωματίδια ή τη διεπιφάνεια. Καθώς η σκληρότητα των σωματιδίων ενίσχυσης αυξάνεται, η αύξηση της φθοράς του υλικού συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων μειώνεται (σχήμα III.28β). Η αύξηση του κατ'όγκον ποσοστού της μήτρας, προκαλεί θεαματική αύξηση της φθοράς του συνθέτου, στην περίπτωση που τα σωματίδια ενίσχυσης είναι σχετικά μαλακά (σχήμα III.28γ).



ΣΧΗΜΑ 11.28. Φθώρα κατά την τριβή σύνθετων υλικών συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων ενίσχυσης (α και β) και του κατ'όγκον ποσοστού της μήτρας (γ).

3.3. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων παρασκευάζονται με μεθόδους κονιομεταλλουργίας: σκόνη από το υλικό της μήτρας αναμιγνύεται με ποσότητα σωματιδίων ενίσχυσης και το μίγμα υποβάλλεται σε έψηση. Οι βασικές τεχνικές της κονιομεταλλουργίας έχουν αναλυτικά περιγραφεί στο κεφάλαιο μορφοποίησης των κεραμικών.

Ευρεία είναι η χρήση της τεχνικής laser με ταυτόχρονο Ψεκάσμο κεραμικής σκόνης σε μεταλλική επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία επιφανειακού στρώματος συνθέτου υλικού με εξαιρετική αντοχή σε τριβή.

Από τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων, αυτά που βρίσκουν τις περισσότερες εφαρμογές είναι τα **κεραμομεταλλικά (cermet)**.

Με το γενικό όρο cermet (cer- από το ceramic, και -met από το metal) αναφερόμαστε σε σύνθετα υλικά, μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση κεραμικών σωματιδίων (π.χ. WC, SiC). Τα υλικά αυτά βρίσκουν εφαρμογές κυρίως σε εργαλεία κοπής.

Η παραγωγή των cermet παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες. Πιο συγκεκριμένα, θα περιγραφεί η διαδικασία παραγωγής WC με 3-20% Co, που αποτελεί τον κύριο αντιπρόσωπο της οικογενείας των cermet. Η έψηση του μίγματος σκόνης κοβαλτίου και σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου, γίνεται σε θερμοκρασία 1350-1500 °C, ώστε να έχουμε τήξη του κοβαλτίου ($T_{m,co} = 1128 \text{ }^\circ\text{C}$). Η μεταλλική υγρή φάση αντιδρά με τα σωματίδια του WC και λαμβάνεται κράμα, οι φάσεις του οποίου προβλέπονται από το αντίστοιχο διάγραμμα ισορροπίας.

Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ευτηκτικό συστατικό Co-W, στο οποίο διαλύονται τα καρβίδια του βολφραμίου. Κατά την απόψυξη που ακολουθεί, τα καρβίδια (WC),

σε λεπτομερή διασπορά, κατακρημνίζονται στη μάζα της πλαστικής μήτρας (Co).

Κατά συνέπεια, ρωγμή που ξεκινά από σωματίδιο WC, αφού το διαπεράσει ταχύτατα μεταδίδεται προς τη μεταλλική μήτρα, η οποία απορροφά ενέργεια και παραμορφώνεται πλαστικά, καθυστερώντας, έτσι, την περαιτέρω διάδοση της ρωγμής. Το cermet αυτό έχει αντοχή σε θραύση περίπου $15 \text{ MPa m}^{1/2}$, ενώ αυτή του καρβιδίου του βολφραμίου είναι μόνον $1 \text{ MPa m}^{1/2}$.

4. ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (Laminar composites)

4. 1. ΓΕΝΙΚΑ

Τα στρωματικά σύνθετα υλικά περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία συνδυασμού υλικών, τα οποία διατάσσονται σε διαδοχικές στρώσεις προκειμένου να συνθέσουν το τελικό προ-ίόν. Στα στρωματικά σύνθετα περιλαμβάνονται τα υλικά με μικρού και μεγάλου πάχους επιστρώματα (thin και thick coatings), τα διμεταλλικά (bimetallics) και τα πολυστρωματικά (multilayers) και sandwich υλικά.

4. 2. ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ (coated materials)

Η δημιουργία επιστρωμάτων συνιστάται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες είτε η κατασκευή ολοκλήρου του αντικειμένου από το υλικό ενίσχυσης είναι οικονομικά ασύμφορη, είτε απαιτείται η "καρδιά" της κατασκευής να έχει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες από την επιφάνεια.

Τα υλικά που φέρουν επιστρώσεις αποτελούν μια ιδιόμορφη κατηγορία συνθέτων υλικών. Η ενίσχυση που προσφέρει το επίστρωμα αφορά την επιφανειακή ενίσχυση του υλικού και πρόκειται, κυρίως, για βελτίωση της αντοχής του υποστρώματος σε διάβρωση και τριβή - φθορά.

Οι τεχνικές δημιουργίας επιστρωμάτων ποικίλλουν σε ένα ευρύτατο φάσμα, ανάλογα με το υλικό ενίσχυσης. Επί παραδείγματι, το χρώμιο, το νικέλιο και το κάδμιο αποτίθενται ηλεκτρολυτικά από υδατικά διαλύματα, επιψευδαργύρωση και επικασσιτέρωση πραγματοποιούνται με εμφύσηση του αντικειμένου σε λουτρό τήγματος, κεραμικά επιστρώματα δημιουργούνται, κυρίως, με τεχνικές θερμού ψεκασμού, κλπ.

Η δημιουργία των επιστρωμάτων πραγματοποιείται μετά από κατάλληλη προετοιμασία του υποστρώματος (π.χ. χημικός καθαρισμός, αμμοβολή, κλπ).

Τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η τεχνολογία των επιστρωμάτων σχετίζονται με τη "συμβατότητα" των δύο υλικών:

α) Τις περισσότερες φορές η αναποτελεσματική ενίσχυση του υποστρώματος οφείλεται σε ατέλειες της διεπιφανειακής επιστρώματος- υποστρώματος (οργανικές ακαθαρσίες, οξειδία και κακή συνάφεια). Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται με τον καλό καθαρισμό της επιφάνειας πριν από την επίστρωσή της και με τη δημιουργία συνδετικού επιστρώματος, μικρού πάχους, το οποίο έχει πολύ καλή συνάφεια τόσο με το υπόστρωμα, όσο και με το επίστρωμα (σχήμα III.29).

β) Τα επιστρώματα που καλύπτουν υλικά τα οποία λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, υφίστανται αποφλοιώση, μικρορωγμάτωση και τελικά αστοχούν, όταν οι διαστασιακές μεταβολές των δύο μερών (επιστρώματος και υποστρώματος) δεν

είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, στη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου.



ΗΜΑ III.29. Οπτική μικρογραφία επιστρώματος ψεκασμού ατμοσφαιρικού πλάσματος: Ζιρκονία σε υπόστρωμα χυτοσιδήρου σφαιροειδούς γραφίτη, με ενδιάμεσο συνδετικό στρώμα Ni-Al (x200).

(γ) Τέλος, μεγάλες διαφορές στις μηχανικές ιδιότητες των δύο μερών, μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του συνθέτου υλικού, κατά την καταπόνησή του.

- Αντιδιαβρωτικά επιστρώματα

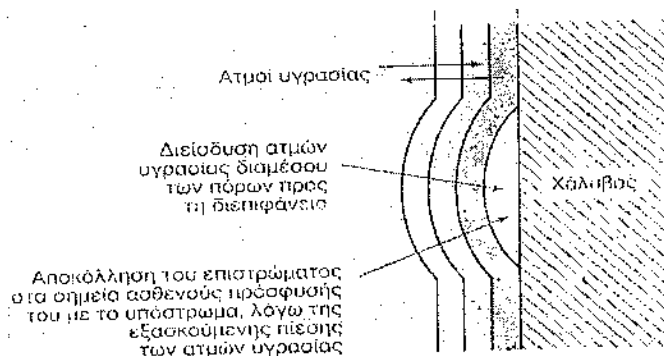
Σχετικά λεπτά επιστρώματα μεταλλικών, ανοργάνων, αλλά και οργανικών υλικών, μπορούν να ανασχέσουν τη διαβρωτική δράση του περιβάλλοντος και να προσφέρουν αποτελεσματική προστασία στο υπόστρωμα.

Εκτός από την καλή συνάφεια με το υπόστρωμα, τα αντιδιαβρωτικά επιστρώματα πρέπει να χαρακτηρίζονται από:

(α) χημική αδράνεια και αντοχή σε κλιματολογικές μεταβολές και

(β) χαμηλό πορώδες, προκειμένου να μειωθούν οι δίοδοι επαφής του υποστρώματος με το διαβρωτικό περιβάλλον.

Στο σχήμα III.30, φαίνεται σχηματικά η τοπική αστοχία αντιδιαβρωτικού συστήματος τριών στρώσεων. Η χαμηλή πρόσφυση με το υπόστρωμα και το υψηλό πορώδες του επιστρώματος επέτρεψαν τη διείσδυση της υγρασίας ως τη διεπιφάνεια επιστρώματος- υποστρώματος. Η τοπική δημιουργία περιοχών υψηλών πιέσεων οδήγησε στην αποκόλληση του επιστρώματος, τη ρωγμάτωση και την τελική αστοχία του.



ΣΧΗΜΑ III.30. Αστοχία αντιδιαβρωτικής επένδυσης χάλυβα.

- Αντιτριβικά επιστρώματα

Για την προστασία των μετάλλων σε τριβή-φθορά χρησιμοποιούνται, συνήθως, κεραμικά επιστρώματα (Al_2O_3 , SiC, TiN, DLC, κλπ). Τα επιστρώματα αυτά φθείρονται με εξαιρετικά χαμηλότερους ρυθμούς από αυτούς του υποστρώματος. Με τον τρόπο αυτό προστατεύουν σε ικανοποιητικό βαθμό κοπτικά εργαλεία, αιχμηρά άκρα εργαλείων, άκρα πτερυγίων στροβιλοκινητήρων αεροπλάνων, κλπ.

- Λεπτά επιστρώματα

Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των τεχνικών απόθεσης υπό κενό (PVD, CVD), έχει επιτευχθεί η δημιουργία πολύ λεπτών επιστρωμάτων με πάχος από μερικά nm ως μερικά μm.

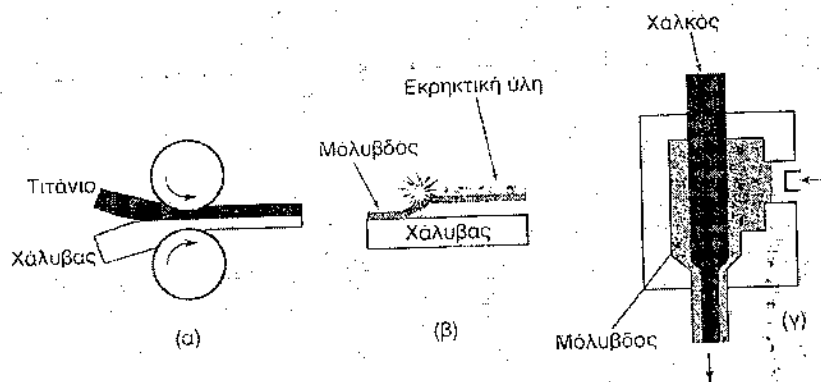
Τα επιστρώματα αυτά βρίσκουν ειδικές εφαρμογές:

- Οπτικές: στα οπτικά μέρη των laser, στους καθρέφτες των αυτοκινήτων, κλπ.
- Ηλεκτρικές: σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, σε ηλιακούς θερμοσυσσωρευτές, κλπ.
- Διακοσμητική: σε σκελετούς γυαλιών, σε ρολόγια, σε μέρη του αυτοκινήτου, κλπ.

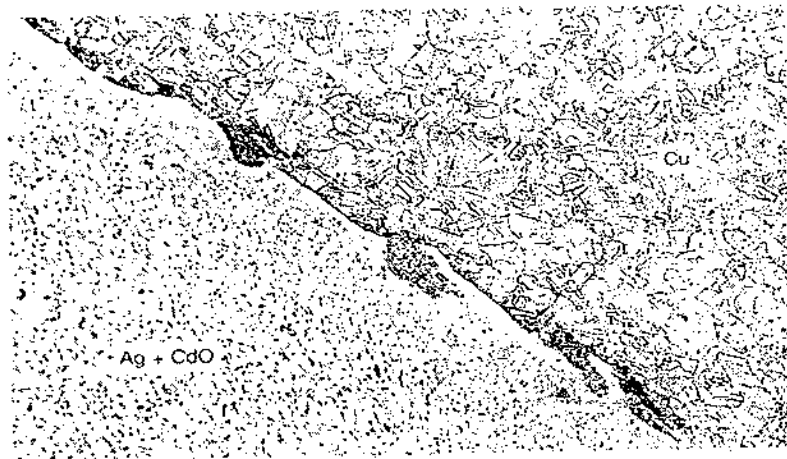
4.3. ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (bimetallics)

Σε αντίθεση με τα σύνθετα της προηγούμενης κατηγορίας, στα οποία το πάχος του επιστρώματος είναι πολύ μικρότερο αυτού του υποστρώματος, στα διμεταλλικά υλικά το πάχος των δύο μεταλλικών στρώσεων είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους.

Η συνένωση των δύο στρώσεων για την παραγωγή του διμεταλλικού γίνεται με συνέλαση (σχήμα III.31α), εκρηκτική συγκόλληση (σχήμα III.31β) και συνδιέλαση (σχήμα III.31γ). Στη διεπιφάνεια του παραγόμενου συνθέτου, η ανακατάταξη και η αναδιευθέτηση των ατόμων των δύο κρυσταλλικών πλεγμάτων τα οποία έρχονται σε επαφή, λόγω θέρμανσης ή πίεσης, εξασφαλίζει την καλή πρόσφυση των δύο στρώσεων (σχήμα III.32).



ΣΧΗΜΑ III.31. Τεχνικές δημιουργίας διμεταλλικών υλικών: συνέλαση (α), εκρηκτική συγκόλληση (β) και συνδιέλαση (γ).



ΣΧΗΜΑ III.32. Κυματοειδής διεπιφάνεια διμεταλλικού υλικού μετά από εκρηκτική συγκόλληση ελασμάτων Ag με διάσπορά σωματιδίων CdO και Cu (οπτική μικρογραφία, x140).

Τα διμεταλλικά υλικά βρίσκουν τη σημαντικότερη εφαρμογή τους στη μέτρηση και τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Η μεγάλη διαφορά στις τιμές του συντελεστή θερμικής διαστολής των δύο στρώσεων, η οποία στην περίπτωση των επιστρωμάτων ήταν αρνητικός παράγοντας, στην περίπτωση των διμεταλλικών υλικών είναι απαραίτητη προϋπόθεση.

Έστω ότι ένα μέταλλο (A) με υψηλό συντελεστή θερμικής διαστολής είναι ισχυρά συνδεδεμένο με μέταλλο (B), μικρότερου συντελεστή θερμικής διαστολής. Όταν το διμεταλλικό AB βρεθεί σε υψηλή θερμοκρασία, το μέταλλο A θα διασταλεί περισσότερο από το B. Λόγω της ισχυρής σύνδεσης στη διεπιφάνεια, αυτή θα κυρτωθεί έχοντας τα κοίλα προς τη μεριά του B. Η καμπυλότητα της παραμόρφωσης μπορεί να μετρηθεί, και μέσω αυτής να καθοριστεί η θερμοκρασία στην οποία βρέθηκε το διμεταλλικό. Τα διμεταλλικά υλικά βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε θερμοστάτες φούρνων και κλιματιστικών και σε διακόπτες ηλεκτρικού ρεύματος.

Για να μπορέσουμε να εκμεταλλευθούμε μια τέτοια συμπεριφορά, θα πρέπει η παραμόρφωση των επιλεγόμενων μετάλλων να είναι αντιστρεπτή, δηλαδή και τα δύο μέταλλα να έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας στη θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο διμεταλλικό ηλεκτρικών εφαρμογών έχει ως σκέλος χαμηλής διασταλτικότητας ένα κράμα σιδήρου-νικελίου (Invar) και ως σκέλος υψηλής διασταλτικότητας ορείχαλκο, κράμα νικελίου-χαλκού (Monel) ή καθαρό νικέλιο.

4.4. ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ SANDWICH ΥΛΙΚΑ (multilayers and sandwich materials)

Τα πολυστρωματικά είναι υλικά πολλών διαδοχικών στρώσεων. Σχηματίζονται από την επανάληψη ενός στοιχειώδους διστρωματικού υλικού A/B, του οποίου το πάχος είναι καθορισμένο και ονομάζεται περίοδος. Η περίοδος των πολυστρωματικών μπορεί να ποικίλλει από μερικά νανόμετρα ως δέκατα του χιλιοστού.

Όπως συμβαίνει και με τα σύνθετα με ενίσχυση ινών ή σωματιδίων, τα πολυστρωματικά σύνθετα προκύπτουν από το συνδυασμό μετάλλου-κεραμικού, μετάλλου-γυαλιού, μετάλλου-πολυμερούς, αλλά και με το συνδυασμό μετάλλων διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Πολύ γνωστά παραδείγματα πολυστρωματικών

είναι η φορμάικα, υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην επιπλοποίηση και το γυαλί ασφαλείας από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα τζάμια των συγχρόνων αυτοκινήτων.

Τα πολυστρωματικά σύνθετα παρουσιάζουν έναν εξαιρετικό συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων, που αποδίδεται στις πολλές διεπιφάνειες στο εξωτερικό του συνθέτου οι οποίες εμποδίζουν τόσο την κίνηση των διαταραχών όσο και τη διάδοση των ρωγμών.

Έχει αποδειχθεί ότι ένα πολυστρωματικό σύνθετο του τύπου A/B, -όπου το μέταλλο A έχει διαταραχές υψηλής ενέργειας και το μέταλλο B) διαταραχές χαμηλής ενέργειας, παρουσιάζει υψηλότερο όριο ελαστικότητας από τα καθαρά μέταλλα A και B.

Πρόσφατες έρευνες απέδειξαν ότι η μικροσκληρότητα πολυστρωματικών (NB, όπου A = μέταλλο και B = κεραμικό) επιστρωμάτων μικρού πάχους είναι συνάρτηση του πάχους της μεταλλικής στρώσεως, ή, ορθότερα, της αποστάσεως μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων (B).

Στην κατηγορία των πολυστρωματικών συνθέτων μπορούμε, επίσης, να κατατάξουμε επιστρωμένα υλικά, στα οποία το επίστρωμα έχει ομαλά μεταβαλλόμενη σύσταση, συναρτήσει της απόστασης από τη διεπιφάνεια υποστρώματος-επίστρωματος. Τα επιστρώματα με βάρθρωση συστάσεως εμφανίζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το αντίστοιχο επίστρωμα σταθερής συστάσεως. Γενικά, πρόκειται για νέα υλικά, των οποίων η μηχανική συμπεριφορά δεν έχει πλήρως διασαφηνιστεί και θεωρητικά τεκμηριωθεί.

Δομικό στοιχείο από **sandwich** υλικό προκύπτει από τη σύνδεση, κόλληση ή συγκόλληση, δύο λεπτών επιδερμίδων (skin) υλικού υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων, πάνω σε μία "καρδιά" ή "Ψίχα" ελαφρού υλικού χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων, που καλείται υλικό πλήρωσης (filler material) και εξασφαλίζει τη διατήρηση της απόστασης μεταξύ των επιδερμίδων.

Το υλικό πλήρωσης είναι είτε κάποιο αφρώδες πολυμερές, συνηθέστερα πολυουρεθάνη, είτε κάποιο ελαφρύ μέταλλο, συνηθέστερα Al, το οποίο είναι διαμορφωμένο σε κυψελοειδή γεωμετρία.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

5.1. Αυτόκινητοβιομηχανία

Το σύνθετο υλικό με την ονομασία Keronite χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ως συστατικό κραμάτων Keronite αλουμινίου, μαγνησίου και τιτανίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η αυξανόμενη χρήση των ελαφριών κραμάτων στην βιομηχανία κατασκευής αυτοκινήτων απαιτεί την επεξεργασία της σκληρότητας της επιφάνειας άνω των 700 HV, η οποία είναι αδύνατη με την παραδοσιακή σκλήρυνση δια υποβολής σε ανοδική οξειδωση. Το σκληρό χρώμιο και το κεραμικό πλάσμα που ψεκάζεται στην επιφάνεια του υλικού είναι σχετικά ακριβά υλικά, όχι πάντα φιλικά προς το περιβάλλον και δεν παρέχουν τα ομοίμορφα στρώματα στα σύνθετα μέρη. Μια εναλλακτική λύση για την σκλήρυνση της επιφάνειας του υλικού αφορά την ανθεκτική εμφάνιση στα ελαφριά κράματα Keronite -κεραμική επεξεργασία επιφάνειας που δημιουργείται από την ηλεκτρολυτική οξειδωση πλάσματος του υλικού των υποστρωμάτων.

5.2. Σωληνώσεις

Μελέτες που έχουν γίνει για σωλήνες από σύνθετα υλικά υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής αντοχής έχουν δώσει νέες δυνατότητες. Αυτές οι δυνατότητες περιλαμβάνουν τη διοχέτευση ρευστού θερμοκρασίας έως και 500 βαθμών F. Αυτοί οι αγωγοί έχουν εξεταστεί για πίεση πάνω από 85 PSI και πάχος τοιχωμάτων 3 mm. Ενώ πριν η διοχέτευση αυτή γινόταν μόνο για μεταλλικά υλικά, μπορεί τώρα να γίνει από αυτά τα σύνθετα υλικά για τη μείωση του βάρους και του κόστους. Οι βελτιωμένες ιδιότητες για FST (φλόγα, καπνός, τοξικότητα), τα σημαντικά επίπεδα θερμικής οξειδωτικής σταθερότητας που συνδυάζεται με την εξαιρετική ρευστή αντίσταση και ένα υψηλό επίπεδο διάρκειας είναι προφανείς με αυτά τα υλικά. Η χρήση των φαινολογικών ρητινών Novalac και τα συστήματα ρητίνης Polyamide υψηλής θερμοκρασίας αποτελούν τη βάση για αυτήν την ανάπτυξη.

5.3. Πυροπροστασία

Τα σύνθετα υλικά είναι απαραίτητα στις διάφορες εφαρμογές για τη θερμική προστασία. Τα διάφορα υλικά μόνωσης γίνονται από διάφορες μορφές συνθέτων υλικών άνθρακα και πυριτίου που προσφέρουν τα βέλτιστα οφέλη όπως η θερμική απόδοση, η διάρκεια, η αντίσταση διάβρωσης, η ακουστική απόδοση, η μείωση βάρους και το κόστος.

5.4. Εφαρμογές στην Οικοδομική

Φυσική σύνθετη αρχιτεκτονική

Χτίζοντας χωρίς τη χρήση της ξυλείας, του σκυροδέματος, του χάλυβα, ή των πετρελαιοειδών.

Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων πέντε ετών το Διεθνές Ίδρυμα Πόρων (International Resource Institute, IRI) έχει εργαστεί για να βρει τους τρόπους να αντικαταστήσει την ξυλεία, το σκυρόδεμα, τον χάλυβα, και τα πετρελαιοειδή που χρησιμοποιούνται στη νέα εγχώρια κατασκευή με τα υλικά που έχουν μια οριστικά χαμηλότερη περιβαλλοντική επίδραση. Το πιο πρόσφατο βιώσιμο σπίτι χρησιμοποιεί σύνθετο υλικό από πηλό μπετονίτη, ίνες κυτταρίνης, τοίχο από άχυρο και το σύστημα στεγών εξαλείφει την ανάγκη για χρήση αποκλειστικά ξυλείας ή χάλυβα.

Ένα από τα βασικά οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν ένα μεγάλο μέρος της ξυλείας, του χάλυβα, του τσιμέντου Πόρτλαντ και ασβέστη και των προϊόντων οικοδομικού ασβέστη είναι ένα φυσικό σύνθετο υλικό που αναπτύσσεται από την εταιρεία IRI. Αυτό το δομικό υλικό γίνεται από δύο συστατικά: το πρώτο είναι ένα συνδετικό υλικό ή μια κόλλα, με την ονομασία ρητίνη, και το δεύτερο, ένα ινώδες υλικό κάποιου τύπου. Ο συνδυασμός των δύο υλικών, μια ιξώδης κόλλα και μια μη κολλώδης ίνα, που αναμιγνύονται στις κατάλληλες αναλογίες και τις διαμορφώσεις, σε ξηρό περιβάλλον, οδηγεί στην παραγωγή μερικών από τα πιο αποδοτικά γνωστά δομικά υλικά.

Η προσέγγιση (IRI) στις σύνθετες δομές είναι εμφανώς αντίθετη με αυτό που συμβαίνει σε όλο το υπόλοιπο της σύνθετης βιομηχανίας. Εκτιμώντας ότι οι περισσότεροι κατασκευαστές σύνθετων υλικών στηρίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε ακριβά ανθρακονήματα υψηλής τεχνολογίας και τις τοξικές εποξικές ρητίνες για να διαμορφώσουν τα σύνθετα υψηλής απόδοσής τους, IRI έχει εστιάσει στη

χρησιμοποίηση μερικών εκ των πιο άφθονων φυσικών, και επομένως ανέξοδων, και μη τοξικών δομικών υλικών. Το κυριότερο μεταξύ αυτών είναι μικροσκοπική και μακροσκοπική ίνα κυτταρίνης (άχυρο, παραδείγματος χάριν) και επεκτατικοί άργιλοι.

Όταν ένας κατάλληλος συνδυασμός ίνας - κυτταρίνης και επεκτατικού άργιλου αφήνεται να ξεραθεί, η υπερβολική συρρίκνωση που προκαλείται από την απώλεια ύδατος αναγκάζει τα μόρια άργιλιού να τραβήξει κάτω περιμετρικά τις ίνες κυτταρίνης, δημιουργώντας ένα πολύ σκληρό σύνθετο υλικό. Χρησιμοποιώντας έναν ειδικό άργιλο επιτύχαμε όριο θραύσης για αυτά τα υλικά περίπου 1400 PSI. Αυτό αντιπαραβάλλει με το σκυρόδεμα που έχει όριο θραύσης 56 PSI και της ξύλινης κατασκευής περίπου 10.000 PSI.

Κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών χρησιμοποιήθηκαν περισσότεροι επεκτατικοί άργιλοι όπως ο βεντονίτης και ο hectorite, ο οποίος έδωσε μεγαλύτερη συρρίκνωση στην ξήρανση και επομένως μεγαλύτερη δύναμη. Οι πιο πρόσφατες δοκιμές μας έχουν οδηγήσει σε όριο θραύσης πλησιάζοντας 6.000 PSI. Και με την εξώθηση του σύνθετου μίγματός μας μέσω ενός μειωτήρα για να δώσει την καλύτερη παράλληλη ευθυγράμμιση ινών στην κυτταρίνη (όπως οι ίνες σε ένα δέντρο) αναμένοντας να επιτευχθεί περίπου το ίδιο όριο θραύσης με την ξύλινη κατασκευή.

Έχουν βρεθεί οι τρόποι να χρησιμοποιήσουμε το σύνθετο κυτταρίνης/ άργιλου για ουσιαστικά κάθε μέρος της δομής ενός κτηρίου από τα θεμέλια μέχρι την τοιχοποιία. Για τα θεμέλια χρησιμοποιείται ένα σύνθετο μίγμα κυτταρίνης / άργιλου και προστίθεται άμμος και αδρανή για να σχηματίσουν ένα ρευστό υλικό σαν το σκυρόδεμα. Επίσης χρησιμοποιείται για τους τοίχους και τη στέγη ένα παχύρρευστο πολτό του υλικού κυτταρίνης / άργιλου για να κολλήσουμε μαζί τα δέματα άχυρου για να διαμορφώσουμε έναν θόλο.

Κατόπιν επικαλύπτουμε την κατασκευή με υψηλής απόδοσης τριών στρώσεων σύνθετα υλικά. Η πρώτη στρώση αποτελείται από ένα παχύρρευστο μίγμα που χρησιμοποιήθηκε για να κολλήσει μαζί τα άχυρα. Εφαρμόζεται στους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους του κτιριακού έργου.

Το μειονέκτημα του φυσικού σύνθετου υλικού είναι η υδροδιαλυτότητά του. Η απορρόφηση της υγρασίας, εάν το υλικό εκτίθεται στο ύδωρ, θα υποβαθμίσει τις φυσικομηχανικές ιδιότητες του υλικού. Ορισμένες προφυλάξεις πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την οικοδόμησή μιας νέας κατασκευής. Για να προστατεύσουμε την εξωτερική τοιχοποιία από την υγρασία αναπτύσσουμε ένα μόνιμο αδιάβροχο επίστρωμα πετρελαίου κιμωλίας λιναρόσπορου.

5.5. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

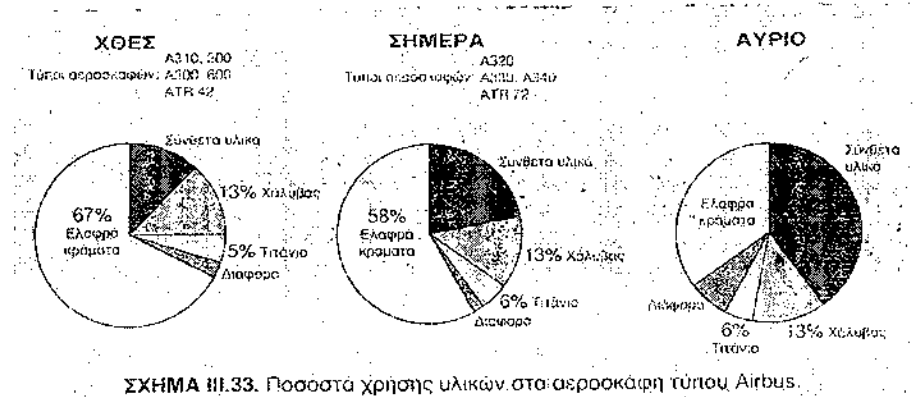
Η εποχή μας χαρακτηρίζεται από τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας νέων υλικών και διαφαίνεται, ήδη, μια τάση: το υλικό του μέλλοντος για την αεροναυπηγική θα είναι το "σύνθετο υλικό".

Τα σύνθετα υλικά από τη μεταπολεμική, κιάλας, περίοδο έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική (πίνακας III.11).

ΠΙΝΑΚΑΣ III.11. Χρονολογική εξέλιξη χρήσης συνθέτων υλικών στην αεροναυπηγική.

ΕΤΟΣ	ΧΡΗΣΗ
1950	Δευτερεύουσες κατασκευές αεροπλάνων και ελικοπτήρων.
1960	Πρωθητήρες ρουκετών.
1965	Εκτοξευτήρες πυραύλων.
1970	Πτερύγια ελικοπτήρων.
1974	Μηχανικά μέρη ελικοπτήρων
1980	Πηδάλια αεροσκαφών πολιτικής αεροπορίας και βασικές κατασκευές πολεμικών αεροσκαφών.

Ο απολογισμός των δύο τελευταίων δεκαετιών και οι προβλέψεις εξέλιξης την επόμενη δεκαετία, δείχνει μια σταθερή αύξηση της χρήσης σύνθετων υλικών εις βάρος των μεταλλικών. (σχήμα III.33).



Ο σχεδιαστής αεροπορικών κατασκευών έχει όλο και περισσότερο την ανάγκη, αλλά και τα μέσα, να βελτιστοποιήσει τα υλικά που θα χρησιμοποιήσει σε συγκεκριμένο τμήμα του αεροσκάφους. Η γνώση αυτή περιλαμβάνει όχι μόνο τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού, αλλά επεκτείνεται στη συμπεριφορά υλικού πολύπλοκης γεωμετρίας στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του.

Τα πλεονεκτήματα και οι ιδιαιτερότητες της χρήσης των σύνθετων, η επιλογή των υλικών, η μεθοδολογία σχεδιασμού τμημάτων αεροσκαφών και, τέλος, η χρήση σύνθετων υλικών σε αεροσκάφη της πολιτικής και πολεμικής αεροπορίας, καθώς και σε ελικόπτερα.

5.5.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

Το ενδιαφέρον των κατασκευαστών αεροσκαφών για τα σύνθετα υλικά εστιάζεται σε δύο κυρίως σημεία:

(α) Ο συνδυασμός της μικρής πυκνότητας και των καλών μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων, επιτρέπει το σχεδιασμό ελαφρύτερων κατασκευών.

(β) Η μορφοποίηση του τελικού τεμαχίου γίνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή της "πρώτης ύλης", γεγονός που προσδίδει ευελιξία στο σχεδιασμό προϊόντων.

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πληθώρα άλλων πλεονεκτημάτων, τα οποία, όμως, αποδίδονται στη φύση της μήτρας και όχι στο συνδυασμό μήτρας-ενισχυτικού.

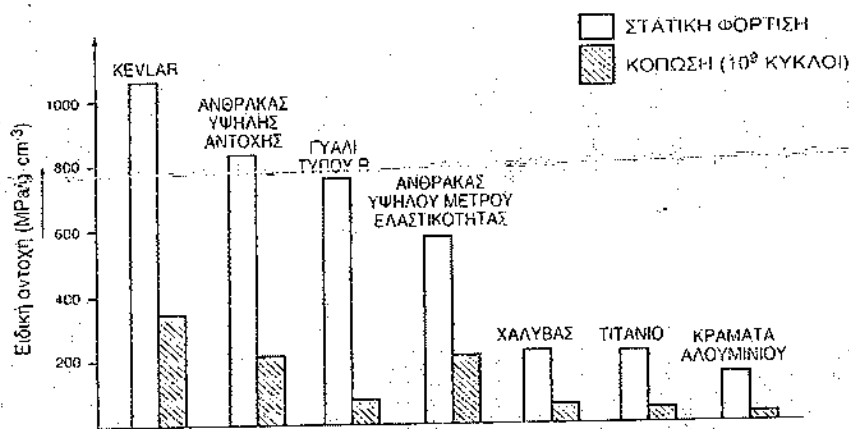
Γενικά, τα πλεονεκτήματα των συνθέτων υλικών που αφορούν την ασφάλεια και την ευκολία παραγωγής και συντήρησης εξαρτημάτων, έχουν άμεση επίδραση στη μείωση του κόστους των κατασκευών.

- Κατασκευές χαμηλού βάρους

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική (γυαλί, άνθρακας, Kevlar και βόριο σε συνδυασμό, κυρίως, με εποξειδικές ρητίνες) παρουσιάζουν καλύτερη ειδική αντοχή και ειδική στιβαρότητα από τα μεταλλικά υλικά τα οποία αντικατέστησαν (χάλυβα, τιάνιο, κράματα αλουμινίου), όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος III.34.

Επιπλέον, η συχνή απαίτηση για ενίσχυση της αντοχής ενός εξαρτήματος κατά ορισμένες μόνο διευθύνσεις, ικανοποιείται σε υψηλό βαθμό, με τη χρήση ανισότροπων συνθέτων με ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών.

Σε σύγκριση με τα μεταλλικά, τα εξαρτήματα που είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά είναι 15-45% ελαφρύτερα.



ΣΧΗΜΑ III.34. Ειδική αντοχή (σ/ρ) διαφόρων υλικών σε στατική φόρτιση και κόπωση.

- Μείωση κόστους

Το κόστος παραγωγής και χρήσης εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά, πολλές φορές είναι υψηλό, λόγω του κόστους των υλικών που συνθέτουν το σύνθετο, κυρίως των ινών. Ωστόσο, με την απλοποίηση της γεωμετρίας των εξαρτημάτων, που μπορεί να επιτευχθεί λόγω της ανισοτροπίας των υλικών αυτών και της μη αναγκαιότητας περαιτέρω κατεργασίας τους, το συνολικό κόστος κατασκευής αεροσκαφών μειώνεται κατά πολύ.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα κύρια στροφέια των ελικοπτέρων. Με την χρήση συνθέτων υλικών για την κατασκευή τους, ο αριθμός των απαιτούμενων τεμαχίων και το συνολικό κόστος (παραγωγής, λειτουργίας και συντήρησης) μειώθηκε στο ένα τρίτο.

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι το κόστος παραγωγής εξαρτημάτων από σύνθετο υλικό είναι μικρότερο ή τουλάχιστον ίσο εκείνου των μεταλλικών εξαρτημάτων.

- Ειδικά πλεονεκτήματα συνθέτων υλικών

Άλλα πλεονεκτήματα των συνθέτων υλικών αφορούν κυρίως έναν παράγοντα

πολύ σημαντικό για τις αερομεταφορές: την ασφάλεια.

Τα σύνθετα που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική είναι στη μεγάλη τους πλειοψηφία σύνθετα με οργανική μήτρα, η οποία δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις διαβρωτικές συνθήκες της ατμόσφαιρας.

Τα σύνθετα αυτά έχουν εξαιρετική συμπεριφορά σε κόπωση, ενώ η ινώδης ενίσχυση εξασφαλίζει υψηλή αντοχή σε αιφνιδιασμούς, κρούσεις και χαράξεις. Η διάδοση τέτοιου είδους βλαβών είναι βραδεία, ενώ ο τρόπος θραύσης που εισάγουν δεν θέτει σε κίνδυνο τη στοιχειώδη λειτουργικότητα του εξαρτήματος, σε χρόνο μικρότερο αυτού μεταξύ δύο προγραμματισμένων ελέγχων.

Τα εξαρτήματα κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά επιδέχονται διορθώσεις. Ωστόσο, το κόστος της επιδιόρθωσης πολλές φορές συναγωνίζεται το κόστος αντικατάστασης του φθαρμένου εξαρτήματος από νέο.

Τέλος, ένα άλλο πλεονέκτημα των συνθέτων υλικών αφορά την αριστοποίηση των δυνατοτήτων του αεροσκάφους. Εκτός της δυνατότητας να παράγονται εξαρτήματα με λείες επιφάνειες, η χρήση συνθέτων υλικών επιτρέπει την κατασκευή τμημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας, επιτρέποντας έτσι την αριστοποίηση αεροδυναμικών παραμέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.1. Ο ΝΕΥΡΩΝΑΣ

Το νευρικό κύτταρο ή νευρώνας, είναι η δομική και λειτουργική μονάδα του νευρικού συστήματος.

Ο νευρώνας είναι ένας εξειδικευμένος τύπος κυττάρου, που αποτελεί τη βασική μονάδα των συστημάτων επεξεργασίας πληροφοριών που απαρτίζουν το νευρικό σύστημα. Έτσι, σε αναλογία με τους Ηλεκτρονικούς Υπολογιστές (Η/Υ), οι νευρώνες αποτελούν το σύνολο των στοιχείων μνήμης, λογικών κυκλωμάτων και εντολών λειτουργίας του εγκεφάλου.

Το βασικότερο χαρακτηριστικό του νευρώνα είναι η ερεθιστότητα του, δηλαδή, η ικανότητα του να αντιδρά σε διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα (ηλεκτρομαγνητικά, θερμικά, μηχανικά, χημικά κλπ.). Αυτή η αντίδραση έχει την μορφή ηλεκτροχημικής διαταραχής της μεμβράνης που μεταδίδεται, από το σημείο ερεθισμού στην επιφάνεια του νευρώνα, προς τις τελικές απολήξεις του.

Οι ηλεκτροχημικές διαταραχές της νευρωνικής κυτταρικής μεμβράνης είναι δύο τύπων:

➤ Ηλεκτροτονικά φαινόμενα, που το μέγεθός τους είναι συνάρτηση της απόστασης στην οποία μεταδίδονται. Πρόκειται για γραμμικά φαινόμενα που μπορεί να αναλυθούν με βάση τις φυσικοχημικές ιδιότητες της νευρωνικής κυτταρικής μεμβράνης και αποτελούν την βάση της διαβαθμισμένης μετάδοσης και επεξεργασίας πληροφοριών στο νευρικό σύστημα.

➤ Το δυναμικό δράσης, που είναι ένα μη γραμμικό φαινόμενο και το μέγεθος του είναι ανεξάρτητο της απόστασης στην οποία μεταδίδεται. Το δυναμικό δράσης αποτελεί την βάση της παλμικής μετάδοσης και επεξεργασίας πληροφοριών στο νευρικό σύστημα και απαντάται σε εξειδικευμένους τύπους νευρωνικών αποφυάδων πχ. στον νευροάξονα.

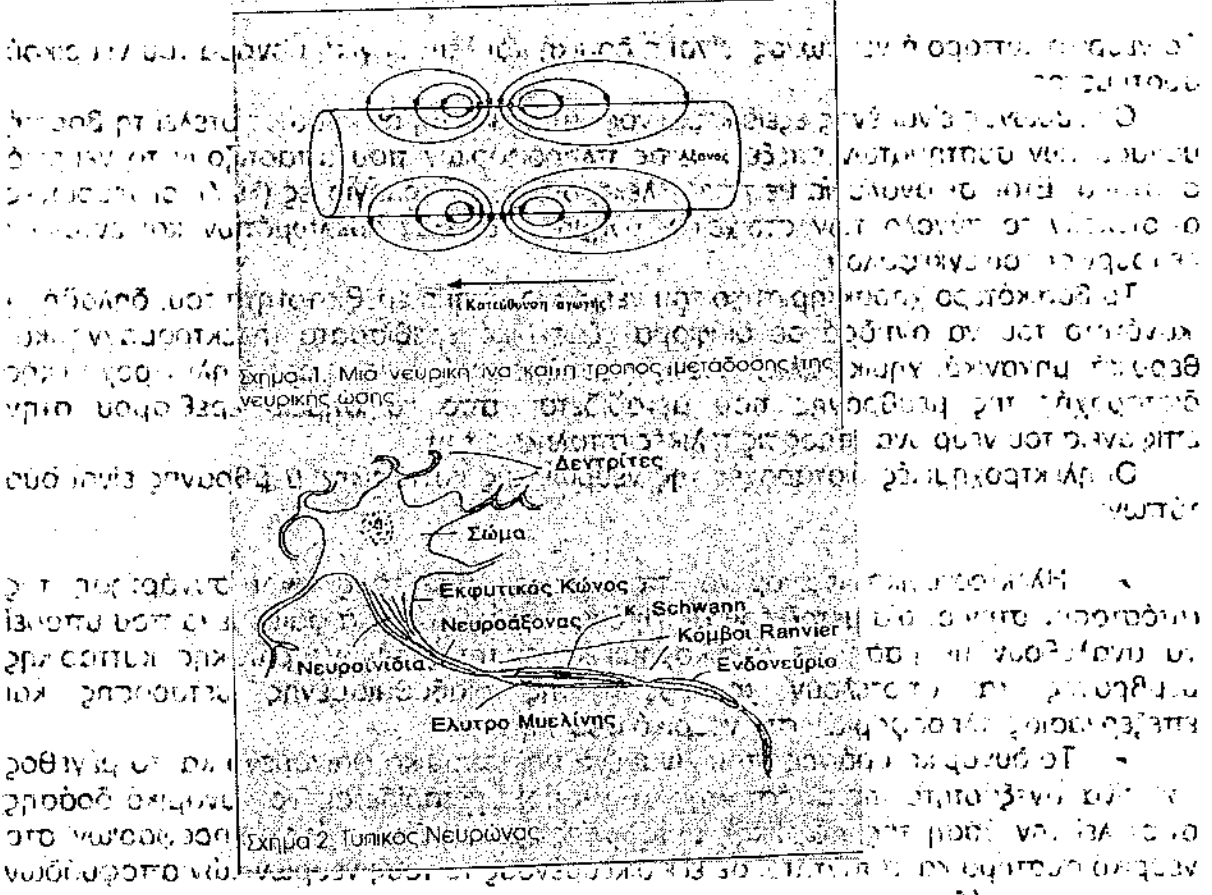
Η παλμική μετάδοση επιτρέπει την επικοινωνία νευρώνων που χωρίζονται από μεγάλες αποστάσεις και αποτελεί την κύρια μορφή επικοινωνίας του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος (ΚΝΣ) με τον υπόλοιπο ανθρώπινο οργανισμό. Επειδή, τεχνικά, η ανίχνευση της είναι εύκολη, έχει μονοπωλήσει το ενδιαφέρον με αποτέλεσμα να επηρεάζει βαθιά την εικόνα που έχουμε σχηματίσει για τη λειτουργία του νευρικού συστήματος.

Σήμερα είναι γνωστό ότι η επεξεργασία των πληροφοριών στο επίπεδο του νευρώνα γίνεται με μετάβαση από ταλάντωση σε παλμό (wave to pulse conversion) και αντίστροφα (pulse to wave conversion). Η μετάδοση του δυναμικού δράσης κατά μήκος του νευροάξονα μπορεί να παρομοιαστεί με την μετάδοση της καύσης κατά μήκος ενός φυτίλιού. Έτσι, το δυναμικό δράσης μεταδίδεται κατά μήκος του νευροάξονα από μια ερεθισμένη περιοχή στην γειτονική ανερέθιστη περιοχή, η οποία με την σειρά της, αφού ερεθιστεί, διεγείρει την επόμενη γειτονική της ανερέθιστη περιοχή κοκ, όπως ακριβώς η μετάδοση της φλόγας στο φυτίλι γίνεται με την ανάφλεξη του αμέσως γειτονικού της άκαυτου τμήματος. Η παρομοίωση θα ήταν τέλεια αν υπήρχε τρόπος, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, το καμένο τμήμα του φυτίλιού να επανέρθει στην αρχική του κατάσταση, δηλαδή, να ήταν έτοιμο να

αναφλέγει (Σχήμα 1).

Το μοντέλο του τυπικού νευρώνα (Σχήμα 2), προέκυψε από τη σύνθεση δεδομένων που υπάρχουν για τους πραγματικούς νευρώνες. Πρόκειται για ένα κατασκευάσμα της δεκαετίας του 1960, επηρεασμένο από τις μελέτες του κινητικού νευρώνα και του γιγάντιου άξονα του

ΖΑΚΟΣΥΝΟΣ, Γ.Ο. Π.Σ

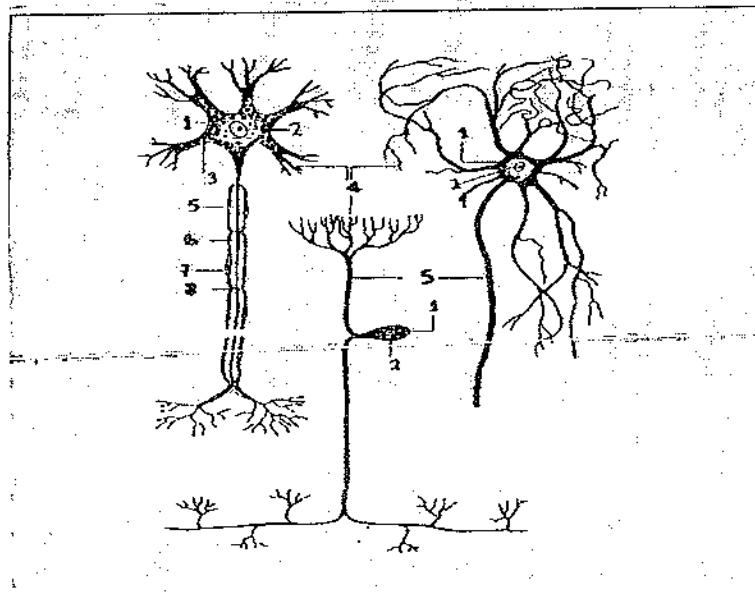


όπου οι νευροϊνίδια του νευροάξονα συνώνονται με τα νευροϊνίδια του σωματιδίου (Eccles). Στην πραγματικότητα υπάρχει μεγάλη ποικιλία νευρώνων (Σχήμα 3); όμως λίγα είναι τα ιδιαίτερα ποιοτικά ή ποσοτικά χαρακτηριστικά που τους ξεχωρίζουν από τα άλλα κύτταρα. Σήμερα, ο τυπικός νευρώνας εξακολουθεί να αποτελεί την βάση κάθε προσπάθειας περιγραφής του νευρικού συστήματος, επειδή είναι ένα κατάρχη ορθό, δυναμικό, και επεκτάσιμο μοντέλο της νευρωνικής λειτουργίας.

Ο τυπικός νευρώνας αποτελείται από το σώμα ή περικάρμιο, που περιέχει τον πυρήνα και τα συστήματα σύνθεσης των πρωτεϊνών του κυττάρου. Από το σώμα εκφυονται οι δένδριτες, που είναι πολυάριθμοι και σχετικά βραχείς (μέχρι 2mm). Ορισμένες φορές οι δένδριτες είναι καλυμμένοι με ακανθες (spines). Ο νευροάξονας, που με τις διακλαδώσεις του, μπορεί να φτάσει το ένα μέτρο μήκος. Όταν ο νευροάξονας εκφυεται κατευθείαν από το σώμα, το αρχικό παχύτερο τμήμα του ονομάζεται εκφυτικός κώνος. Ο εκφυτικός κώνος είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικός στους κινητικούς νευρώνες του νωτιαίου μυελού και αποτελεί το πιο

ευερέθιστο τμήμα της κυτταρικής τους μεμβράνης. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι δύσκολο να γίνει σαφής διαχωρισμός του νευροάξονα από τις άλλες αποφυάδες. Συνήθως ονομάζουμε δεντρική ή δεκτική ζώνη (receptive field) την περιοχή του νευροάξονα που δέχεται ερεθίσματα από άλλους νευρώνες, ενώ νευροάξονα ονομάζουμε την κυλινδρική αποφυάδα που άγει νευρικές ώσεις, οι οποίες "απομακρύνονται" από την δεντρική ζώνη.

Επομένως η θέση του σώματος δεν παίζει όλο στην διαχείριση των πληροφοριών διαμέσου του νευρώνα και η επιφάνεια του μπορεί να θεωρηθεί ως τμήμα της δεντρικής ζωής η κόμη και να έχει χαρακτηριστικά του νευροάξονα. Σε ορισμένες περιπτώσεις σώμα είναι αρκετά απομακρυσμένο από το δεντρικό - νευροαξονικό σύμπλεγμα και συνδέεται με αυτό με μια κυλινδρική ίνα, η οποία μπορεί να δέχεται ερεθίσματα από άλλους νευρώνες.



Σχήμα 3. Διάφοροι τύποι νευρώνων. 1. κυτταρικό σώμα 2. πυρήνας 3. κυταρόφλοισμα 4. δενδρίτες 5. νευροάξονας 6. έλυτρο μυελίνης 7. κύτταρο έλυτρου μυελίνης 8. περιοφίξεις του Ranvier.

οι νευρώνες απολήγουν σε ένα ειδικό μόρφωμα που ονομάζεται συναπτικό κομβίο και αποτελεί την θέση της λειτουργικής επαφής(σύναψη) ανάμεσα σε δύο κύτταρα(Σχήμα 4.α). Η περιοχή ανάμεσα στο τελικό κομβίο και στην απέναντι κυτταρική επιφάνεια έχει πλάτος γύρω στα 200Å και ονομάζεται συναπτική σχισμή (synaptic cleft). Ο νευρώνας από τον οποίο εκφύεται το συναπτικό κομβίο ονομάζεται νητασυναπτικός, ενώ εκείνος στον οποίο προσκολλάται ονομάζεται νητασυναπτικός. Τα συναπτικά κομβία μπορεί να είναι προσκολλημένα και σε άλλα κύτταρα(πχ. εκκριτικά, μυϊκά κλπ.). Στην περίπτωση των νευρώνων του ΚΝΣ τα συναπτικά κομβία των νευροαξόνων μπορεί να καλύψουν μέχρι το 95% της επιφάνειας του σώματός και των δενδριτών. Ο μέσος όρος των συναπτικών κομβίων ανά νευρώνα βρέθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 80 και 140 (έξω γονατώδες σώμα του επίμυα), ενώ έμμεσοι προσδιορισμοί (εγκεφαλικός φλοιός ποντικού, επίμυα και πιθήκου) τοποθετούν αυτό τον αριθμό από 6×10^3 έως 6×10^4 με πιθανότητα να φθάνει μέχρι 10^5 (κύτταρα Purkinje της παρεγκεφαλίδας).

Οι νευρώνες αποτελούν το 10% του συνολικού αριθμού των εγκεφαλικών

κυττάρων, ενώ η τεράστια πλειοψηφία είναι τα νευρογλοιακά κύτταρα. Ο εγκεφαλικός ιστός μπορεί να παρομοιαστεί με ένα νευρωνικό δίκτυο βυθισμένο σε μια νευρογλοιακή θάλασσα. Παρόμοια παρατήρηση ισχύει για τον νωτιαίο μυελό ενώ στα περιφερικά νεύρα τον ρόλο των νευρογλοιακών κυττάρων έχουν αναλάβει τα κύτταρα του Schwann. Τα νευρογλοιακά κύτταρα βρίσκονται πολύ κοντά στους νευρώνες και συχνά χαρακτηρίζονται ως δορυφορικά κύτταρα (satellite cells). Η τρισδιάστατη απεικόνιση με την βοήθεια Η/Υ αποκαλύπτει ένα εξαιρετικά πολύπλοκο γλυπτό που η επιφάνεια του λαξεύτηκε από τους νευρώνες με τους οποίους εφάπτεται (Σχήμα 4.β). Μεταξύ νευρώνων και νευρογλοιακών κυττάρων υπάρχει μεταβολικός συντονισμός, ενώ τα ενδοκυττάρια ηλεκτρικά δυναμικά των νευρογλοιακών κυττάρων επηρεάζονται από τα δυναμικά δράσης των νευρώνων με τους οποίους εφάπτονται. Ο φυσιολογικός ρόλος των νευρογλοιακών κυττάρων είναι ο εξής:

- Περιορίζουν την επαφή μεταξύ των νευρώνων μόνο στις συνάψεις.
- Ρυθμίζουν την χημική και ιοντική σταθερότητα του περιβάλλοντος των νευρώνων (πχ. απομάκρυνση περίσσειας νευροδιαβιβαστών, ιόντων καλίου).
- Απομακρύνουν τα υπολείμματα των κατεστραμμένων νευρώνων (φαγοκυττάρωση) και συμβάλλουν στις μακροχρόνιες μεταβολές που χαρακτηρίζουν το νευρικό σύστημα (πχ. ωρίμανση, γήρανση μάθηση).

Συνήθως οι νευροάξονες περιβάλλονται από ένα ή δυο έλυτρα (Σχήμα 5). Το πρώτο από αυτά είναι το έλυτρο του Schwann, που αποτελείται από τα ομώνυμα κύτταρα, ενώ το δεύτερο είναι το έλυτρο της μυελίνης που αποτελεί ένα διαφοροποιημένο και εξειδικευμένο μέρος του ελύτρου του Schwann και σχηματίζεται από την πολλαπλή περιέλιξη της κυτταρικής μεμβράνης των κυττάρων του Schwann γύρω από τον νευροάξονα. Οι νευροάξονες που δεν καλύπτονται από έλυτρο μυελίνης ονομάζονται αμύελοι σε αντίθεση με τους εμύελους.

Τα σημεία όπου διακόπτεται το έλυτρο της μυελίνης (περίπου κάθε 1mm) και ο νευροάξονας μένει ακάλυπτος, ονομάζονται περισφίξεις του Ranvier. Το μύελινο έλυτρο ανάμεσα σε δύο διαφορετικές περισφίξεις του Ranvier σχηματίζεται από ένα μόνο κύτταρο του Schwann (Σχήμα 2 και Σχήμα 5).

Τέλος μια νευρική οδός μπορεί να συμμετάσχει στη λειτουργία του νευρικού συστήματος μόνο μετά την ολοκλήρωση της μυελίνωσης της. Η μυελίνωση των νευροαξόνων είναι ένα φαινόμενο που δεν εμφανίζεται ταυτόχρονα σε όλο το νευρικό σύστημα. Έτσι, αρχίζει κατά την διάρκεια της εμβρυϊκής ζωής από τις αισθητικές οδούς, ενώ η μυελίνωση των κινητικών οδών (πχ. της πυραμιδικής οδού) αρχίζει αργότερα και συμπληρώνεται κατά το δεύτερο έτος της ηλικίας.

Έχει υπολογιστεί ότι ο εγκέφαλος καταναλώνει το 15% της ενέργειας που παράγεται από τον ανθρώπινο μεταβολισμό, ποσό το οποίο είναι δυσανάλογο ως προς το βάρος του, που αποτελεί το 2% το σωματικού βάρους. Αυτή η μεγάλη ενεργειακή απαίτηση σχετίζεται με τον ρόλο των νευρώνων στην ανάλυση, μετάδοση και αποθήκευση των πληροφοριών στο ΚΝΣ και οφείλεται στην μεταβολική ιδιαιτερότητα των νευρώνων και των νευρογλοιακών κυττάρων. Κάθε νευρώνα περιέχει περίπου 6×10^9 μόρια πρωτεϊνών, 10×10^9 μόρια λιπιδίων και 600×10^9 μόρια RNA, αλλά και ένα τεράστιο αριθμό άλλων ουσιών. Τα 2/3 του βάρους ενός νευρώνα στο ΚΝΣ αντιστοιχούν στα 1500 κατά μέσον όρο μιτοχόνδρια που περικλείει.

Οι νευρώνες έχουν την ικανότητα να παρασκευάζουν και να εκλύουν εξειδικευμένες

χημικές ουσίες όπως είναι νευροδιαβιβαστές που διαχέονται στην συναπτική σχισμή από τη προσυναπτικό νευρώνα προς τον μετασυναπτικό και επηρεάζουν την ηλεκτρική συμπεριφορά του. Άλλοι νευροδιαβιβαστές θεωρούνται υπεύθυνοι για την συναπτική συνδεσμολογία των νευρώνων. Είναι γνωστό ότι οι βλάβες των περιφερικών νευρών έχουν ως αποτέλεσμα την μερική ή ολική ατροφία των μυών που νευρούν, λόγω ελάττωσης ή διακοπής της "τροφικής" επιδράσεως των κινητικών νευρώνων προς τις μυϊκές ίνες.

Οι συνδέσεις των νευρώνων του εγκεφάλου (πρακτικά άπειρες) βρίσκονται σε μια δυναμική κατάσταση πλαστικότητας. Η ισορροπία αυτών των συνδέσεων διαμορφώνεται από την σταθερή ανταλλαγή ουσιών μεταξύ των διασυνδεμένων νευρώνων.

Μια άλλη ιδιότητα των νευρώνων είναι η ικανότητα τους να αντεπεξέρχονται στις απαιτήσεις της δυσανάλογης σχέσης επιφάνειας - όγκου. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια του νευρώνα παρουσιάζει συνεχή διαρροή ουσιών (ιόντα K^+) προς το εξωκυττάριο περιβάλλον. Ακόμη, υπάρχει το πρόβλημα της διείσδυσης ουσιών που διαπερνούν τη νευρωνική μεμβράνη και εκτρέπουν την χημική ισορροπία του νευρώνα (ιόντα Na^+). Η αντιστάθμιση αυτών των φαινομένων επιτυγχάνεται με μηχανισμούς που λειτουργούν αντίθετα προς το ηλεκτροχημικό δυναμικό της νευρωνικής μεμβράνης και απαιτούν την δαπάνη ενέργειας (πχ. αντλία $K^+ - Na^+$). Επομένως για την διατήρηση της κυτταρικής ομοιοστασίας, η ενέργεια πρέπει:

- Να παραχθεί μέσα στον περιορισμένο ενδοκυτταρικό όγκο.
- Να εξοικονομηθεί μονώνοντας το ενδοκυτταρικό περιβάλλον στο επίπεδο των νευρωνικής μεμβράνης (δηλαδή, με την μείωση των εμπειρικών συντελεστών διάχυσης).

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί η φύση είναι η εντατικοποίηση του ρυθμού παραγωγής ενέργειας. Έτσι, ο νευρώνας έχει ιδιαίτερη υψηλή περιεκτικότητα σε μιτοχόνδρια και εξαρτάται από την παροχή οξυγόνου. Η μείωση αυτής της παροχής πχ. για 10sec, επηρεάζει σοβαρά την νευρωνική λειτουργία (απώλεια συνείδησης). Ακόμη, η φύση του φαινομένου της μόνωσης του ενδοκυτταρικού περιβάλλοντος με μείωση του εμπειρικού συντελεστή διάχυσης κάποιας ουσίας, είναι διαφορετική από την "μόνωση" του νευροάξονα κατά την μυελίνωση. Με την μυελίνωση περιορίζονται οι διαστάσεις του "εξωκυτταρικού" περιβάλλοντος και επιτυγχάνεται ο εγκλωβισμός ουσιών που διαφεύγουν από τον νευρώνα (ιόντα K^+ κατά το δυναμικό δράσης). Έτσι περιορίζεται η επαναπρόσληψη των χρήσιμων ουσιών και απομακρύνονται ευκολότερα οι άχρηστες. Επομένως το έλυτρο της μυελίνης είναι μια ενδιάμεση βαθμίδα συγκέντρωσης ουσιών μεταξύ μυελίνης και εξωτερικού του κυττάρου.

Η νευρωνική μεμβράνη αποτελεί δυναμική οργανική ενότητα που βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη. Τα δομικά φωσφολιπίδια της συνεχώς ανασυντίθενται από ελεύθερα λιπαρά οξέα που με τη σειρά τους προέρχονται από την αποδόμηση των φωσφολιπιδίων της μεμβράνης. Τόσο η σύνθεση των δομικών στοιχείων της μεμβράνης, όσο και η αποδόμηση τους, προϋποθέτουν την κατανάλωση ενέργειας η οποία είναι ανάλογη με την επιφάνεια της μεμβράνης του κυττάρου, και κατά συνέπεια, ιδιαίτερα υψηλή στην περίπτωση του νευρώνα.

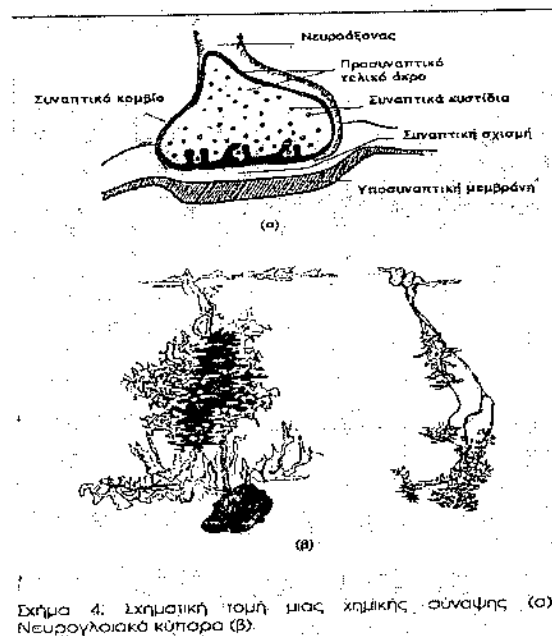
Στο ΚΝΣ των θηλαστικών, η ταχύτητα διάδοσης των σημάτων (δυναμικό δράσης) στο νευρικό σύστημα είναι περιορισμένη και δεν ξεπερνάει τις μερικές δεκάδες μέτρα το δευτερόλεπτο. Ακόμη, έχει βρεθεί ότι η κατανάλωση οξυγόνου στον εγκέφαλο, που είναι ευθέως ανάλογη την παραγωγή ενέργειας από τον μεταβολισμό και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα των κυττάρων σε

ένα ιστό, είναι $26.3 \text{ mm}^3 \text{ O}_2/\text{mg}$ ξηρού βάρους ιστού (dry weight)/ώρα, σε αντίθεση με άλλους ιστούς πχ. του πνεύμονα όπου φθάνει τα $8,6 \text{ mm}^3 \text{ O}_2/\text{mg}$ ξηρού βάρους ιστού / ώρα. Αυτό σημαίνει ότι η πυκνότητα των εγκεφαλικών κυττάρων είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

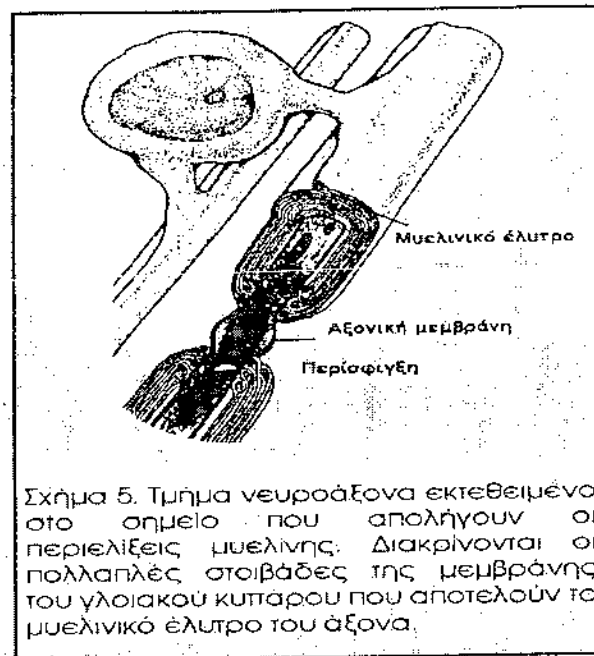
Η διατήρηση διαφοράς δυναμικού, καθώς και η παρουσία του δυναμικού ηρεμίας στην μεμβράνη, είναι χαρακτηριστικά των ζώντων κυττάρων. Κατά την διέλευση μιας διεγερτικής νευρική, ώσης, εμφανίζονται ηλεκτροχημικά φαινόμενα, που έχουν ως αποτέλεσμα την μεταβολή της διαπερατότητας της μεμβράνης στα ιόντα Na^+ και K^+ , τα οποία συμβάλλουν στην πόλωση της μεμβράνης και στην γένεση των δυναμικών δράσης.

Το φαινόμενο μπορεί να μελετηθεί τοποθετώντας μικροηλεκτρόδια μέσα και έξω από την μεμβράνη του κυττάρου ή στην εξωτερική επιφάνεια του νεύρου ή του σώματος. Τα δυναμικά ηρεμίας κυμαίνονται από -65 mV έως -90 mV . Συνήθως, λαμβάνεται μέση τιμή -70 mV . Τα ερεθίσματα μπορεί να είναι θερμικά, χημικά μηχανικά ή ηλεκτρικά.

Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι το πραγματικό ποσό Na^+ που κερδίζεται και K^+ που χάνεται κατά την διάρκεια του δυναμικού δράσης, είναι πολύ μικρό. Έτσι, το κύτταρο μπορεί να πυροδοτεί επανειλημμένα, χωρίς εξάντληση των ιόντων K^+ , ενώ η αντλία Na^+/K^+ λειτουργεί συνεχώς, αποκαθιστώντας τις αρχικές περιεκτικότητες Na^+ και K^+ .



Σχήμα 4: Σχηματική τομή μιας χημικής συναψης (α). Νευρογλοιακά κύτταρα (β).



Σχήμα 5. Τμήμα νευροάξονα εκτεθειμένο στο σημείο που απολήγουν οι περιλίξεις μυελίνης. Διακρίνονται οι πολλαπλές στοιβάδες της μεμβράνης του γλοιακού κυττάρου που αποτελούν το μυελινικό έλυτρο του άξονα.

2.2 ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Δεν υπάρχουν κατασκευαστικά όρια στην πολυπλοκότητα των δικτύων που μπορεί να προκύψουν από την σύνδεση των εξόδων (outputs) - με τις εισόδους (inputs) των νευρώνων. Ωστόσο, υπολογίστηκε ότι κατά μέσον όρο ο εγκεφαλικός φλοιός περιέχει 10^{11} νευρώνες με 1000 συνάψεις ο καθένας και συνολικά 10^{14} συνάψεις. Αν συνυπολογιστεί ότι ο εγκέφαλος λειτουργεί με ταχύτητα περίπου 100 HZ, τότε προκύπτει ότι η ταχύτητα του είναι 10^{16} συνάψεις/δευτερόλεπτο! Αυτή η εκπληκτική ταχύτητα επεξεργασίας πληροφοριών επιτυγχάνεται λόγω της ικανότητας λειτουργίας του εγκεφάλου εν παραλλήλω. Όταν ο αριθμός των νευρώνων ενός πραγματικού νευρωνικού δικτύου (ΠΝΔ) ξεπεράσει τους 3-7 νευρώνες, και επιπλέον εξοπλιστεί με αισθητικές και κινητικές συσκευές, τότε μπορεί να εμφανίσει ευέλικτη συμπεριφορά προσαρμογής.

Η τοπολογική οργάνωση ενός ΠΝΔ, αναπαρίσταται από ένα σύστημα γραμμών που αντιπροσωπεύουν ξεχωριστά κανάλια. Θεωρούμε ότι υπάρχουν έξι βασικές τοπολογικές διατάξεις νευρωνικών κυκλωμάτων για την διακίνηση των πληροφοριών:

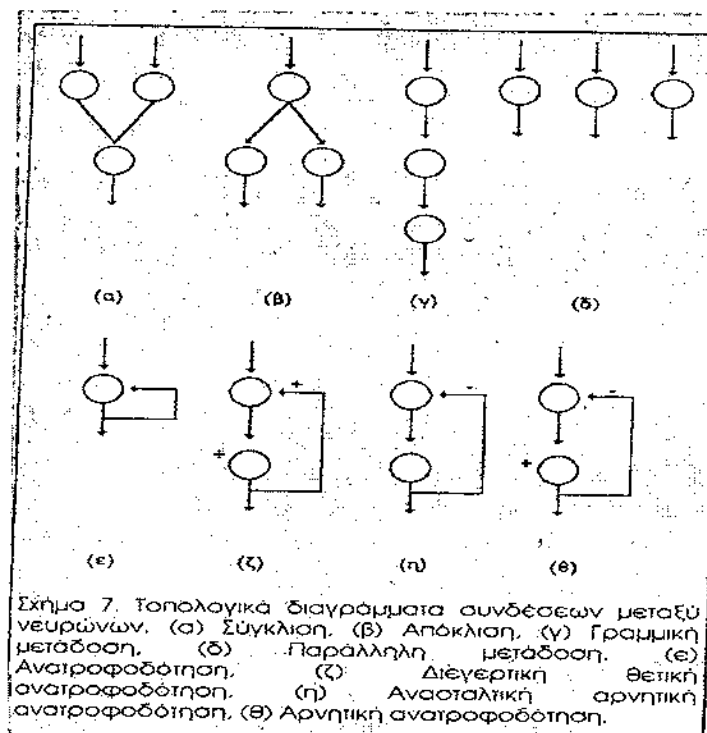
- Διατάξεις Σύγκλισης, όπου οι άξονες δυο ή περισσότερων νευρώνων, καταλήγουν στους δεντρίτες και στο σώμα ενός νευρώνα. (Σχήμα 7.α).
- Διατάξεις Απόκλισης, όπου ο άξονας ενός νευρώνα, καταλήγει σε δύο ή περισσότερους νευρώνες (Σχήμα 7.β).
- Διατάξεις Γραμμικής Μετάδοσης, όπου η έξοδος κάποιου νευρώνα, μεταδίδεται στον επόμενο (Σχήμα 7.γ).
- Διατάξεις Παράλληλης Μετάδοσης, όπου δυο ή περισσότεροι

νευρώνες, δέχονται είσοδο από μια άλλη ομάδα νευρώνων και μεταδίδουν παράλληλα σε κάποιον άλλο νευρώνα (Σχήμα 7.δ).

- Διατάξεις Προώθησης, όπου ένας νευρώνας δεν τροφοδοτεί την έξοδο στον εαυτό του. Τα κανάλια αυτά θεωρούνται "προωθητικά" (Σχήμα 7.α-δ).
- Διατάξεις Παλίνδρομης Ρύθμισης, όπου η έξοδος ενός νευρώνα τροφοδοτείται με κάποιο κανάλι (ή σύστημα καναλιών) στην είσοδό του, σχηματίζοντας έτσι βρόγχους ανατροφοδότησης (Σχήμα 7.ε-θ).

Σε αυτό το σημείο πρέπει να υπογραμμιστεί ότι ένα κανάλι μπορεί να είναι διεγερτικό (+) ή ανασταλτικό (-). Ακόμη ένας νευρώνας του οποίου η έξοδος ανατροφοδοτείται στον εαυτό του, ονομάζεται αυτοδιεγερτικός ή αυτοανασταλτικός αντίστοιχα (Σχήμα 7.ε). Τέλος, δύο νευρώνες που η έξοδος του καθενός αποτελεί είσοδο για τον άλλον, σχηματίζουν έναν βρόγχο ανατροφοδότησης (feedback loop). Αν ο ένας νευρώνας είναι διεγερτικός και ο άλλος ανασταλτικός (Σχήμα 7. η) μιλάμε για αρνητική ανατροφοδότηση.

Η γρήγορη πυροδότηση διαδοχικών, μετασυναπτικών δυναμικών σε ένα νευρώνα, έχει ως αποτέλεσμα την άθροιση των επιμέρους διεγέρσεων της μεμβράνης και ονομάζεται χρονική διευκόλυνση. Η φυσιολογική σημασία της είναι μεγάλη, διότι πολλές νευρικές λειτουργίες (πχ. εκφορτίσεις υποδοχέων) έχουν επαναλαμβανόμενο χαρακτήρα.



Τέλος, το φαινόμενο όπου δύο ή περισσότερα σύγχρονα συνεχή ερεθίσματα αθροίζονται με αποτέλεσμα να ξεπερνούν το κατώφλι διέγερσης και να παράγουν δυναμικά δράσης στο μετασυναπτικό κύτταρο, ονομάζεται Χωρική Διευκόλυνση.

2.2.1 ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ.

Τα ανασταλτικά ΠΝΔ καταστέλλουν ή περιορίζουν την υπερβολική διέγερση του ΚΝΣ. Μπορούμε να πούμε ότι όσο ισχυρότερη είναι η διέγερση, τόσο αυξάνει και η ανάλογη αναστολή. Έτσι, η φαρμακολογική διακοπή μιας ανασταλτικής διαδικασίας στο ΚΝΣ πχ. μεστρυχνίνη, μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε θάνατο. Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Αναστολή των ανταγωνιστών νευρώνων (φιαλοειδείς νευρώνεςGolgi).
- Αναστολή κυττάρων Renshaw

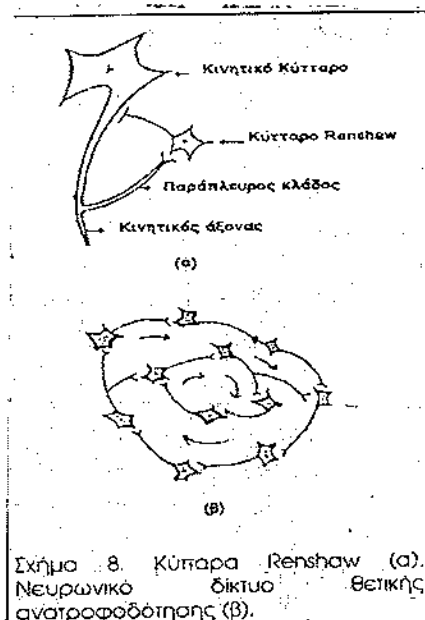
Στα πρόσθια κέρατα του Νωτιαίου Μυελού βρίσκονται μικροί ενδιάμεσοι νευρώνες που ονομάζονται κύτταρα Renshaw. Τα κύτταρα αυτά ενεργοποιούνται από παράπλευρους κλάδους του νευρίτη των κινητικών νευρώνων και ανατροφοδοτούν τους τελευταίους, αναστέλλοντας έτσι την δράση τους (feed-back inhibition Σχήμα β.α).

Πρόδρομη αναστολή. Ορισμένες νευρικές οδοί στην παρεγκεφαλίδα, μετά από κάποια καθυστέρηση ή άλλες διαδικασίες, ανατροφοδοτούν τους νευρώνες απ' όπου ξεκίνησε η μετάδοση της νευρικής διέγερσης. Η αναστολή αυτή ονομάζεται "πρόδρομη" (feedforward inhibition).

2.2.2 ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΘΕΤΙΚΗ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΑΠΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ.

Η σπουδαιότητα αυτών των ΠΝΔ για την καλή λειτουργία του ΚΝΣ είναι μεγάλη. Με την ανατροφοδότηση της εξόδου τους, ενισχύουν την δραστηριότητα άλλων ομάδων νευρικών Κυττάρων που βρίσκονται ήδη σε διέγερση. Με αυτό τον τρόπο, μια νευρωνική διέγερση μπορεί να συντηρηθεί για αρκετό χρόνο στο ΚΝΣ. Πολλοί ερευνητές επιχειρούν να ερμηνεύσουν την λειτουργία της βραχείας μνήμης (short term memory) με την διέγερση τέτοιων ΠΝΔ (Σχήμα β.β).

Η επαναλαμβανόμενη χρήση μιας σύναψης, έχει συχνά ως αποτέλεσμα την αύξηση των συναπτικών δυναμικών, που ονομάζεται συναπτική ενίσχυση. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και κατά την επαναλαμβανόμενη (τετανική) διέγερση, οπότε ονομάζεται τετανική ενίσχυση.



Σχήμα 8. Κύτταρα Retshaw (α).
Νευρωνικό δίκτυο θετικής
ανάτροφοδότησης (β).

Λειτουργικά, η συναπτική ενίσχυση διευκολύνει την εκτέλεση μιας κεντρικής νευρικής διαδικασίας, ως αποτέλεσμα "εξάσκησης", δηλαδή, η συναπτική ενίσχυση μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδικασία μάθησης. Ας σημειωθεί ότι οι πλέον παρατεταμένες μετατετανικές ενισχύσεις", εμφανίζονται στον ιππόκαμπο, δηλαδή, μια δομή που θεωρείται ότι εξειδικεύεται στην λειτουργία της μνήμης και της μάθησης.

2.3 ΟΡΙΣΜΟΙ

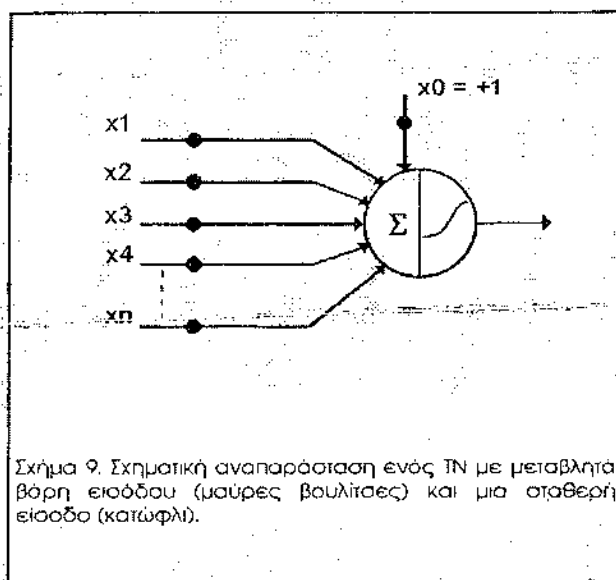
Ένα ΤΝΔ είναι κάποιο υπολογιστικό σύστημα που εκτελεί ορισμένες τουλάχιστον από τις χαρακτηριστικές λειτουργίες των πραγματικών νευρωνικών δικτύων (ΠΝΔ). Μερικά από τα πλεονεκτήματα των ΤΝΔ είναι:

- Παράλληλη επεξεργασία.
- Μνήμη.
- Ικανότητα εκμάθησης τυχαίων συναρτήσεων εισόδου εξόδου.
- Ικανότητα προσαρμογής.
- Απλές υπολογιστικές μονάδες (ΤΝ).

Ένα ΤΝΔ αποτελείται από τεχνητούς νευρώνες (ΤΝ) που αποτελούν την υπολογιστική μηχανή του (Σχήμα 9) και είναι οργανωμένοι σε επάλληλα στρώματα (επίπεδα, layers). Συνήθως υπάρχει ένα επίπεδο εισόδου (με ή χωρίς υπολογιστικές ικανότητες) όπου εισάγεται το εκπαιδευτικό διάνυσμα εισόδου ή το διάνυσμα ελέγχου, ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα όπου γίνεται η (μη) γραμμική επεξεργασία των πληροφοριών και, τέλος, ένα επίπεδο εξόδου που, συνήθως, διαθέτει υπολογιστική ικανότητα και μεταφέρει τα αποτελέσματα στον έξω κόσμο. Ο αριθμός των ΤΝ μπορεί να κυμαίνεται από μερικές ΤΝ έως μερικές χιλιάδες ΤΝ.

Συνήθως όλοι οι ΤΝ υλοποιούν την ίδια συνάρτηση μεταφοράς, χωρίς αυτό να είναι δεσμευτικό. Η σύνδεση των ΤΝ υλοποιείται με "βάρη" που σταθμίζουν την έξοδο κάθε ΤΝ. Η συνδεσμολογία καθώς και η συνάρτηση μεταφοράς που υλοποιεί "κάθε ΤΝ μπορεί να ποικίλλει. Ακόμη εφαρμόζεται κάποιος αλγόριθμος εκπαίδευσης ο οποίος τροποποιεί τις τιμές των βαρών, έτσι ώστε το ΤΝΔ να υλοποιήσει την επιθυμητή απεικόνιση των διανυσμάτων εισόδου στα διανύσματα εξόδου. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά στοιχειοθετούν ένα μοντέλο ΤΝΔ (paradigm). Μερικά γνωστά μοντέλα ΤΝΔ είναι του Hopfield, του Kohonen, το backpropagation, το counterpropagation και το ART.

Ορισμένα μοντέλα ΤΝΔ ομοιάζουν σημαντικά με τα ΠΝΔ, όμως κανένα δεν προσομοιώνει όλες τις λειτουργίες των ΠΝΔ. Άλλωστε πολλές λειτουργίες των ΠΝΔ δεν είναι σαφώς γνωστές. Τέλος σε ορισμένα ΤΝΔ ο κατασκευαστής τους δίνει κάποιες ικανότητες οι οποίες δεν απαντώνται καθόλου στα ΠΝΔ.



2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΝΔ

Τα ΤΝΔ μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες:

- Τα στατικά όπως είναι το BP και το RBF που η έξοδος του είναι κάποια συνάρτηση μόνον του τρέχοντος διανύσματος εισόδου.
- Τα δυναμικά όπως είναι το Hopfield που περιγράφονται από εξισώσεις διαφορών ή ακόμη και διαφορικές εξισώσεις.

Τα στατικά ΤΝΔ υλοποιούν συναρτήσεις της μορφής $Y = f(x)$ όπου το x είναι πραγματικός αριθμός και η συνάρτηση Y λαμβάνει συνήθως τιμές στο διάστημα $[0, 1]$ ή ακόμη μπορεί να είναι και πραγματικός αριθμός. Οι χώροι των x και Y είναι πολυδιάστατοι και με διαφορετική διάσταση ο καθένας. Τα στατικά ΤΝΔ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αναγνώριση προτύπων, προσέγγιση συναρτήσεων κλπ. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των στατικών ΤΝΔ που εξετάζονται στα επόμενα είναι:

- Το μοντέλο του ΤΝΔ.
- Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης και η πολυπλοκότητα του
- Η ικανότητα γενίκευσης.
- Οι εφαρμογές του.

2.5 ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΩΝ ΤΝΔ

Αν θεωρήσουμε ότι τα διανύσματα εισόδου αποτελούνται από d μεταβλητές δηλαδή ο υπερχώρος των διανυσμάτων εισόδου έχει διάσταση d και κάθε μεταβλητή λαμβάνει N διακριτές τιμές, τότε το πρόβλημα της εκπαίδευσης στοιχειοθετείται από N διανύσματα εισόδου που λαμβάνουν N διακριτές τιμές. Μπορούμε να φανταστούμε ότι με την εκπαίδευση το ΤΝΔ σχηματίζει υποθέσεις για το ποιον της υποκείμενης συναρτήσεως διανυσμάτων εισόδου/εξόδου. Τα εκπαιδευτικά διανύσματα εισόδου είναι τα "στοιχεία" που βοηθούν στην ανακάλυψη της σωστής συναρτήσεως. Βέβαια όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος του ΤΝΔ τόσο περισσότερες συναρτήσεις μπορεί να υλοποιήσει και επομένως αυξάνει η πιθανότητα η επιθυμητή συνάρτηση να βρίσκεται σε αυτό το σύνολο συναρτήσεων.

Αν υποθέσουμε ότι το μέγεθος του ΤΝΔ είναι αρκετά μεγάλο ώστε να συμπεριλαμβάνει την επιθυμητή συνάρτηση, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα εκπαιδευτικά διανύσματα εισόδου μας δίνουν την δυνατότητα απόρριψης των ανεπιθύμητων συναρτήσεων. Όσο περισσότερα εκπαιδευτικά διανύσματα διαθέτουμε τόσο περισσότερες συναρτήσεις μπορούμε να απορρίψουμε. Αν όμως, το μέγεθος του ΤΝΔ δεν είναι αρκετά μεγάλο, τότε, το ΤΝΔ αναζητεί την συνάρτηση που ταιριάζει καλύτερα με την επιθυμητή.

Υπάρχει μια πληθώρα αλγορίθμων οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την "εκπαίδευση" των ΤΝΔ. Στην πράξη η εκπαίδευση κάποιου ΤΝΔ ισοδυναμεί με την ενδυνάμωση ή αποδυνάμωση των τιμών των βαρών, σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζει ο αλγόριθμος εκπαίδευσης, μέχρι αυτά να λάβουν τις κατάλληλες τιμές.

Οι μεθοδολογίες εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται:

- Με εποπτεία από εξωτερική πηγή (supervised).
- Χωρίς εποπτεία (unsupervised)
- Με ανταγωνισμό των ΤΝ.

Κατά την εκπαίδευση με εποπτεία παρουσιάζονται στο ΤΝΔ ζευγάρια διανυσμάτων εισόδου - εξόδου και το ΤΝΔ προσπαθεί να κατασκευάσει μια σχέση (συνάρτηση) των διανυσμάτων όσο το δυνατόν πιστότερη. Πιο συγκεκριμένα, κάποιος αλγόριθμος καθοδήγησης από εξωτερική πηγή ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία βήμα προς βήμα σύμφωνα με την οποία. Αν θεωρήσουμε ότι τα διανύσματα εισόδου αποτελούνται από d μεταβλητές δηλαδή ο υπερχώρος των διανυσμάτων εισόδου έχει διάσταση d και κάθε μεταβλητή λαμβάνει N διακριτές τιμές, τότε το πρόβλημα της εκπαίδευσης στοιχειοθετείται από N διανύσματα εισόδου που λαμβάνουν N διακριτές τιμές. Μπορούμε να φανταστούμε ότι με την εκπαίδευση το ΤΝΔ σχηματίζει υποθέσεις για το ποιον της υποκείμενης συναρτήσεως διανυσμάτων εισόδου/εξόδου. Τα εκπαιδευτικά διανύσματα εισόδου είναι τα "στοιχεία" που βοηθούν στην ανακάλυψη της σωστής συναρτήσεως. Βέβαια όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος του ΤΝΔ τόσο περισσότερες συναρτήσεις μπορεί

να υλοποιήσει και επομένως αυξάνει η πιθανότητα η επιθυμητή συνάρτηση να βρίσκεται σε αυτό το σύνολο συναρτήσεων.

Αν υποθέσουμε ότι το μέγεθος του ΤΝΔ είναι αρκετά μεγάλο ώστε να συμπεριλαμβάνει την επιθυμητή συνάρτηση, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα εκπαιδευτικά διανύσματα εισόδου μας δίνουν την δυνατότητα απόρριψης των ανεπιθύμητων συναρτήσεων. Όσο περισσότερα εκπαιδευτικά διανύσματα διαθέτουμε τόσο περισσότερες συναρτήσεις μπορούμε να απορρίψουμε. Αν όμως, το μέγεθος του ΤΝΔ δεν είναι αρκετά μεγάλο, τότε, το ΤΝΔ αναζητεί την συνάρτηση που ταιριάζει καλύτερα με την επιθυμητή.

Υπάρχει μια πληθώρα αλγορίθμων οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την "εκπαίδευση" των ΤΝΔ. Στην πράξη η εκπαίδευση κάποιου ΤΝΔ ισοδυναμεί με την ενδυνάμωση ή αποδυνάμωση των τιμών των βαρών, σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζει ο αλγόριθμος εκπαίδευσης, μέχρι αυτά να λάβουν τις κατάλληλες τιμές.

Οι μεθοδολογίες εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται:

- Με εποπτεία από εξωτερική πηγή (supervised).
- Χωρίς εποπτεία (unsupervised)
- Με ανταγωνισμό των ΤΝ.

Κατά την εκπαίδευση με εποπτεία παρουσιάζονται στο ΤΝΔ ζευγάρια διανυσμάτων εισόδου - εξόδου και το ΤΝΔ προσπαθεί να κατασκευάσει μια σχέση (συνάρτηση) των διανυσμάτων όσο το δυνατόν πιστότερη. Πιο συγκεκριμένα, κάποιος αλγόριθμος καθοδήγησης από εξωτερική πηγή ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία βήμα προς βήμα σύμφωνα με την οποία τροποποιούνται οι τιμές των βαρών που συνδέουν τους ΤΝ. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την μεταβολή των βαρών είναι:

- Οι τρέχουσες τιμές των βαρών.
- Οι εισοδοί (σταθμισμένο άθροισμα) των ΤΝ
- Οι έξοδοι (δραστηριότητα) των ΤΝ.
- Οι επιθυμητές έξοδοι

Η επαναληπτική διαδικασία σταματάει όταν ελαχιστοποιηθεί κάποια συνάρτηση σφάλματος η οποία δίνει το μέτρο της διαφοράς της πραγματικής εξόδου από την επιθυμητή έξοδο του ΤΝΔ. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η πιθανότητα παγίδευσης του ΤΝΔ σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.

Κατά την εκπαίδευση χωρίς εποπτεία παρουσιάζονται στο ΤΝΔ μόνον τα διανύσματα εισόδου τα οποία ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με την σχετική ομοιότητα τους (αυτοοργάνωση του ΤΝΔ). Πιο συγκεκριμένα κάποιος αλγόριθμος χωρίς εποπτεία πραγματοποιεί ψευδοτυχαίες μεταβολές των τιμών των βαρών. Από τις μεταβολές διατηρούνται μόνον αυτές που βελτιώνουν (ελαχιστοποιούν) την συνάρτηση σφάλματος. Η εφαρμογή κατάλληλης στρατηγικής για την επιλογή του μεγέθους των μεταβολών των τιμών των βαρών οδηγεί στην εύρεση του ολικού ελαχίστου της συνάρτησης σφάλματος. Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την εύρεση του ολικού ελαχίστου.

Κατά την εκπαίδευση με ανταγωνισμό οι ΤΝ συναγωνίζονται για το ποιος θα "μείνει ζωντανός". Στην απλούστερη περίπτωση απομένει δραστηριοποιημένος μόνον ο ΤΝ που έχει την μεγαλύτερη δραστηριοποίηση ενώ οι υπόλοιποι ΤΝ

καταστέλλονται. Οι διάφορες μέθοδοι εκπαίδευσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό πχ. το κρυφό επίπεδο κάποιου iΓΝΔ να εκπαιδευτεί από αλγόριθμο χωρίς εποπτεία και το επίπεδο εξόδου να εκπαιδευτεί από αλγόριθμο με εποπτεία.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι επειδή απαιτούνται πολλοί επαναληπτικοί υπολογισμοί για την εκπαίδευση των ΤΝΔ, συνήθως αυτή πραγματοποιείται σε νεκρό χρόνο (εκπαίδευση off line), πριν από την χρησιμοποίηση του ΤΝΔ για την λύση του προβλήματος εφαρμογής. Τέλος, το μέγεθος του ΤΝΔ είναι ανάλογο με την πολυπλοκότητα του προβλήματος το οποίο καλείται να επιλύσει, ενώ ο αριθμός των εκπαιδευτικών διανυσμάτων πρέπει να είναι ανάλογος με τον αριθμό των βαρών.

2.6 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΓΕΝΙΚΕΥΣΗΣ

Ως γενίκευση ορίζεται η ικανότητα του ΤΝΔ να αποδίδει εξίσου καλά με διανύσματα τα οποία δεν έχει γνωρίσει κατά την διαδικασία εκπαίδευσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα γενίκευσης ενός ΤΝΔ είναι:

- Ο αριθμός των εκπαιδευτικών διανυσμάτων και αν αυτά αναπαριστούν ικανοποιητικά τον υπερχώρο από τον οποίο προέρχονται. Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εκπαιδευτικών διανυσμάτων τόσο καλύτερη λύση μπορεί να βρεθεί.
- Η πολυπλοκότητα του προβλήματος.
- Το μέγεθος του ΤΝΔ.

Αν διατίθεται μεγάλος αριθμός εκπαιδευτικών διανυσμάτων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ΤΝΔ σταθερού μεγέθους και εν συνεχεία να προσδιορίσουμε τον αριθμό των εκπαιδευτικών διανυσμάτων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την βέλτιστη ικανότητα γενίκευσης. Αν διαθέτουμε μικρό αριθμό εκπαιδευτικών διανυσμάτων πρέπει να προσδιορίσουμε το μέγεθος του ΤΝΔ που βελτιστοποιεί την ικανότητα γενίκευσης.

2.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΤΝΔ

Ο έλεγχος της απόδοσης κάποιου ΤΝΔ μπορεί να γίνεται με κάποια συνάρτηση σφάλματος, είτε στο εκπαιδευτικό σύνολο διανυσμάτων, είτε σε "άγνωστο" σύνολο διανυσμάτων τα οποία δεν έχει δει προηγουμένως το ΤΝΔ. Για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι όπως το "ανακάτωμα" των διανυσμάτων και ο τυχαίος διαχωρισμός των συνόλων εκπαίδευσης και ελέγχου.

Αρκετό ενδιαφέρον για τον έλεγχο απόδοσης παρουσιάζουν η "ανάκληση" (recall) και η "ακρίβεια" (precision) ενός ΤΝΔ. Η ανάκληση ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των διανυσμάτων κάποιας κατηγορίας που ταξινομούνται σωστά από το ΤΝΔ, ως προς τον πραγματικό αριθμό των διανυσμάτων που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία. Η ακρίβεια ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των διανυσμάτων κάποιας κατηγορίας που ταξινομούνται σωστά από το ΤΝΔ, ως προς τον συνολικό αριθμό των διανυσμάτων που ταξινομούνται σε αυτή την κατηγορία (ορθά ή λανθασμένα). Για παράδειγμα, αν σε μια κατηγορία ανήκουν 50 διανύσματα και το ΤΝΔ ταξινομεί σωστά τα 40, τότε η ανάκληση είναι 40/50, ενώ εάν σε αυτή την κατηγορία ταξινομήσει πχ. 7 διανύσματα που ανήκαν σε άλλες κατηγορίες, τότε η ακρίβεια είναι 40/57.

2.8 ΔΗΜΟΦΙΛΗ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΝΔ

ΤΝΔ με ιστορική σημασία

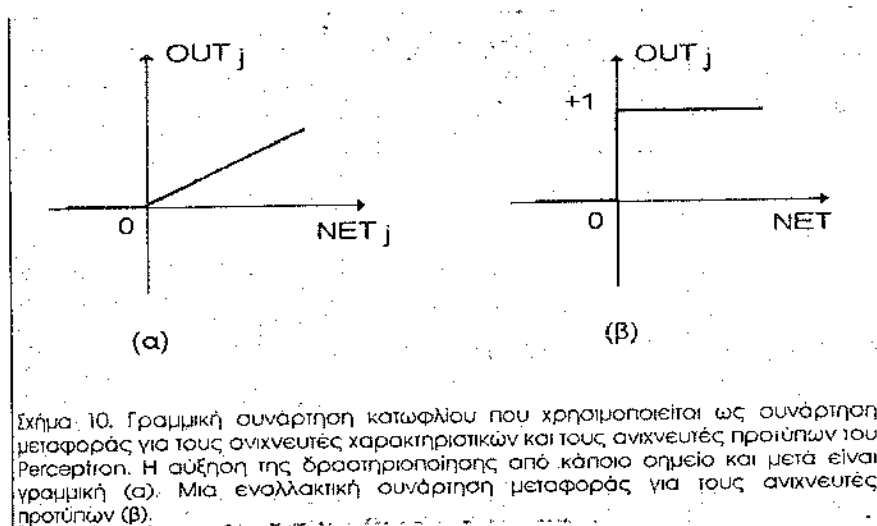
Το "Perceptron", το "Adeline" και Brain State in a Box, που παρουσιάζονται στην συνέχεια, είναι μερικά από τα πρώτα ΤΝΔ που αποτέλεσαν την ιστορική και επιστημονική βάση πάνω στην οποία στηρίχτηκαν οι έρευνες για την κατασκευή ΤΝΔ.

2.8.1 Perceptron.

Ο τύπος αυτός ΤΝΔ προτάθηκε από τον Rosenblatt στα μέσα της δεκαετίας του 50 για να εξηγήσει την αναγνώριση προτύπων από το οπτικό σύστημα και θεωρήθηκε ως ένα λειτουργικό μοντέλο του αμφιβληστροειδή. Πρόκειται για ένα πολύ απλό ΤΝΔ που η βασική του ιδέα είναι η θεώρηση του αμφιβληστροειδή ως διαδιάστατης διάταξης φωτοαισθητηρίων. Τα φωτοαισθητήρια συνδέονται πλήρως ή τυχαία με αμετάβλητα βάρη W_{ji} με ανιχνευτές χαρακτηριστικών (ΤΝ) που έχουν την ικανότητα να αναγνωρίζουν κάποια συγκεκριμένα πρότυπα. Για να δραστηριοποιηθεί κάποιος ΤΝ πρέπει το σταθμισμένο άθροισμα εισόδου (Σχήμα 10.α) :

$$NET_j = \sum W_{ji} * X_i \geq 0$$

Ακόμη υπάρχει το επίπεδο εξόδου που αποτελείται από ΤΝ που λειτουργούν ως "ανιχνευτές προτύπων" (Perceptrons) και συνδέονται με μεταβλητά βάρη και με τυχαίο τρόπο με κάποιους από τους ανιχνευτές χαρακτηριστικών. Ως συνάρτηση μεταφοράς του Perceptron χρησιμοποιείται η γραμμική συνάρτηση κατωφλίου (Σχήμα 10.α). Αυτά τα χαρακτηριστικά του Perceptron προέρχονται από φυσιολογικές παρατηρήσεις. Έτσι, πχ. στην περίπτωση του αμφιβληστροειδή οι νευρώνες πυροδοτούνται μόνον όταν η δραστηριότητα εισόδου υπερβεί κάποιο κατώφλι. Στην συνέχεια ο ρυθμός πυροδότησης αυξάνει ανάλογα με την αύξηση της εισόδου.



Η εκπαίδευση του Perceptron πραγματοποιείται με εποπτεία και με μεταβολή των βαρών του επιπέδου εξόδου. Οι βασικοί κανόνες του αλγόριθμου εκπαίδευσης είναι:

- Τα βάρη δεν μεταβάλλονται αν η έξοδος λάβει την επιθυμητή τιμή.
- Αν η έξοδος είναι 0 ενώ θα έπρεπε να είναι 1, τότε αυξάνονται τα βάρη που αντιστοιχούν σε ενεργές εξόδους ανιχνευτών χαρακτηριστικών (μεγαλύτερες από το κατώφλι).
- Αν η έξοδος είναι 1 ενώ θα έπρεπε να είναι 0, τότε ελαττώνονται τα βάρη που αντιστοιχούν σε ενεργές εξόδους ανιχνευτών χαρακτηριστικών (μεγαλύτερες από το κατώφλι).

Το μέγεθος της μεταβολής των βαρών μπορεί να είναι:

- Σταθερό.
- Μεταβλητό και ανάλογο με την διαφορά του σταθμισμένου αθροίσματος εισόδου από την επιθυμητή έξοδο.
- Ίσο με το σταθμισμένο άθροισμα εισόδου.
- Συνδυασμός κάποιας σταθερής τιμής και κάποιας μεταβλητής τιμής μεταβολής βάρους.

Αν το μέγεθος της μεταβολής είναι μεγάλο επιτυγχάνεται πιο γρήγορη σύγκλιση αλλά βέβαια αυξάνεται η αστάθεια.

Ο Rosenblatt απέδειξε το λεγόμενο "Θεώρημα σύγκλισης του Perceptron" το οποίο λέει ότι:

Αν δοθεί ένα διάνυσμα εισόδου και ένα αντίστοιχο διάνυσμα επιθυμητών εξόδων, τότε υπάρχει κάποιος τρόπος εκπαίδευσης του ΤΝΔ για V_G επιτευχθεί η επιθυμητή έξοδος, αν (και μόνον αν), υπάρχουν οι κατάλληλες τιμές για τα βάρη.

Η απόδειξη βασίζεται στο γεγονός ότι η διαδικασία εκπαίδευσης αντιστοιχεί με μια βαθμιαία μείωση στον χώρο των βαρών. Τέλος το θεώρημα δεν προσδιορίζει τον

αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται για να επιτευχθεί η σύγκλιση του ΤΝΔ.

Ο βασικός περιορισμός του Perceptron είναι η αδυναμία ταξινόμησης μη γραμμικά διαχωρίσιμων εισόδων. Αυτό σημαίνει, ότι για να ταξινομηθούν σωστά όλα τα διανύσματα που ανήκουν στον υπερχώρο των διανυσμάτων εισόδου και που ανήκουν σε κάποια κατηγορία ταξινόμησης, πρέπει να βρίσκονται στην ίδια "πλευρά" του υπερχώρου που διαχωρίζει τις κατηγορίες ταξινόμησης. Για παράδειγμα, αν έχουμε δύο ΤΝ στο επίπεδο εισόδου, τότε ο διαχωριστικός υπερχώρος είναι μια απλή γραμμή, για τρεις ΤΝ ο διαχωριστικός υπερχώρος είναι ένα επίπεδο του τρισδιάστατου ευκλείδειου χώρου κλπ.

Σε πραγματικά προβλήματα τις περισσότερες φορές οι εισοδοί δεν είναι γραμμικά διαχωρίσιμες, όπως για παράδειγμα στο περίφημο πρόβλημα της λογικής συνάρτησης XOR. Η αδυναμία του Perceptron να επιλύσει τέτοια προβλήματα ώθησε ορισμένους ερευνητές στην πρόωρη καταδίκη του. Μεταξύ αυτών, οι Minsky και Papert απέδειξαν, ότι για την ταξινόμηση διαφόρων σχημάτων απαιτείται ένας πολύ μεγάλος αριθμός ανιχνευτών χαρακτηριστικών. Από τότε όμως έχουν παρουσιαστεί διάφορες παραλλαγές του Perceptron με τις οποίες μειώνεται, με χρήση επιλεκτικής ανάδρασης, ο αριθμός των απαιτούμενων ανιχνευτών χαρακτηριστικών, καθώς και παραλλαγές όπου ανιχνευτές

Χαρακτηριστικών εξειδικευμένοι στην διαχείριση κάποιας περιοχής της εικόνας διασυνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε να σχηματίσουν πολλαπλά επίπεδα.

Σήμερα παρά τα όποια μειονεκτήματα της αρχικής σχεδίασης του Perceptron, υπάρχουν ΤΝΔ που βασίζονται σε πολύ - επίπεδα Perceptrons και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως η οπτική αναγνώριση χαρακτήρων και η τεχνητή όραση των ρομπότ.

2.8.2 Adaline (Adaptive linear neurone).

Ο τύπος αυτός ΤΝΔ προτάθηκε από τον Widrow και αποτελεί μια από τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές των ΤΝΔ. Το Adaline έχει την ικανότητα να ταξινομεί μόνον ψηφιακά γραμμικά διαχωρίσιμα διανύσματα εισόδου (όπως το Perceptron). Ο n ΤΝ του Adaline διαθέτει μεταβλητά βάρη, εκ των οποίων ένα είναι συνδεδεμένο με μοναδιαία είσοδο, αναλαμβάνοντας έτσι τον ρόλο του κατωφλίου του κβαντιστή. Κάποιο διάνυσμα εισόδου X_n λαμβάνει μόνον τις τιμές -1 και $+1$. Το σταθμισμένο άθροισμα NET_n των εισόδων επεξεργάζεται από έναν κβαντιστή ο οποίος είναι το στοιχείο λήψης αποφάσεων. Οι στάθμες εξόδου του κβαντιστή είναι $OUT_n = -1$ ή $OUT_n = +1$ (Σχήμα 11). Οι αρχικές τιμές των βαρών πρέπει να είναι τυχαίες, για να αποφεύγεται η παγίδευση του αλγορίθμου εκπαίδευσης στα τοπικά ελάχιστα του υπερχώρου των βαρών. Αυτό ο υπερχώρος έχει διάσταση ίση με τον αριθμό των βαρών και κάθε "σημείο" του αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα βαρών.

Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης του Adaline (κανόνας Δέλτα) προτάθηκε από τους Widrow-Hoff και λειτουργεί με εποπτεία μοιάζει με τον αλγόριθμο του Hebb). Ο κανόνας Δέλτα εγγυάται σύγκλιση, αν υπάρχει κάποιο σύνολο βαρών. Πιο συγκεκριμένα αν DES_n είναι η επιθυμητή έξοδος για το διάνυσμα εισόδου X_n , και $LCOEF$ είναι ο ρυθμός εκπαίδευσης, το γραμμικό σφάλμα E_n υπολογίζεται ως εξής:

$$E_n = DES_n - NET_n \quad (2)$$

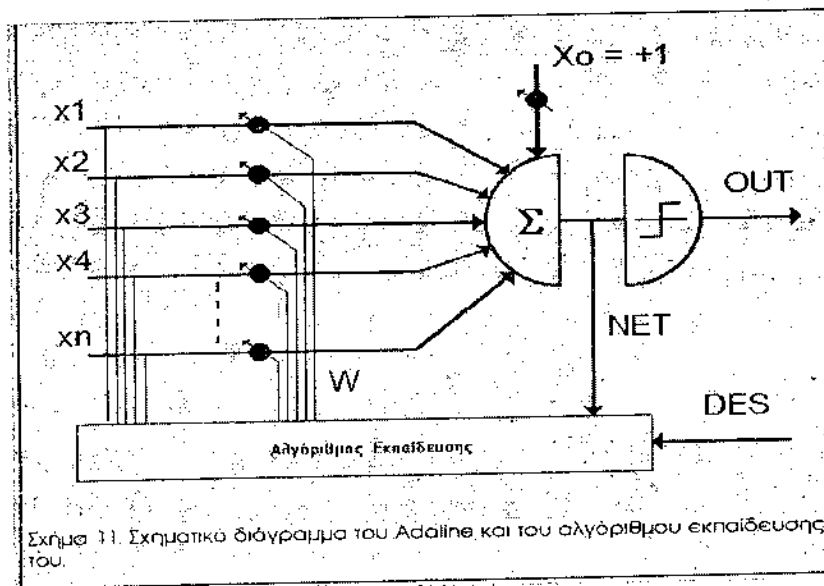
Στην συνέχεια η μεταβολή του i βάρους γίνεται ως εξής:

$$\Delta W_{in} = \text{LCOEF} * E_n * X_{in} / |X_n|^2 \quad (3)$$

Επειδή οι εισόδοι λαμβάνουν μόνον δύο διακριτές τιμές -1 και τελικά η μεταβολή των τιμών των βαρών όπως φαίνεται από την [3], γίνεται κατά κάποια σταθερή τιμή και ανάλογα με το πρόσημο της εισόδου. Επίσης το γραμμικό σφάλμα θα μειώνεται ως εξής:

$$\Delta E_n = -\text{LCOEF} * E_n \quad (4)$$

Επομένως όπως φαίνεται από την [4] το σφάλμα μειώνεται ανά ένα ποσοστό LCOEF και η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα διανύσματα εισόδου. Τυπική περιοχή τιμών του LCOEF είναι το διάστημα (0,2). Με πειραματικές μετρήσεις βρέθηκε ότι το Adaline συγκλίνει σε μια σταθερή λύση μετά από αριθμό επαναλήψεων ίσο με το πενταπλάσιο του αριθμού των βαρών. Αν η εκπαίδευση συνεχιστεί και μετά την εκμάθηση κάποιου διανύσματος εισόδου, τότε υπάρχει περίπτωση ο αλγόριθμος να αποκλίνει. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται μειώνοντας τον ρυθμό εκπαίδευσης. Επομένως το LCOEF ελέγχει την ταχύτητα σύγκλισης αλλά και την σταθερότητα του αλγορίθμου.



Για να παρακαμφθεί η απαίτηση γραμμικού διαχωρισμού των διανυσμάτων εισόδου, κατασκευάστηκε το Madaline (Multiple dalines) που αποτελείται από ένα επίπεδο Adalines, τα οποία συνδέονται με σταθερά μοναδιαία βάρη με τον μοναδικό ΤΝ του επιπέδου εξόδου (Σχήμα 12). Η συνάρτηση μεταφοράς που υλοποιεί αυτός ο ΤΝ μπορεί να είναι το λογικό AND, το λογικό OR ή η συνάρτηση πλειοψηφίας MAJ που δίνει ως τιμή εξόδου την τιμή που έχει η πλειοψηφία των εισόδων του Madaline (-1 ή +1). Αν επιθυμούμε να ταξινομήσουμε κάποια διανύσματα εισόδου σε περισσότερες από δύο κατηγορίες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλαπλά ανεξάρτητα Madalines, ένα για κάθε ζευγάρι κατηγοριών. Στην πράξη, πριν εισάγουμε τα διανύσματα εισόδου στο ΤΝΔ, τα αντιστοιχούμε σε

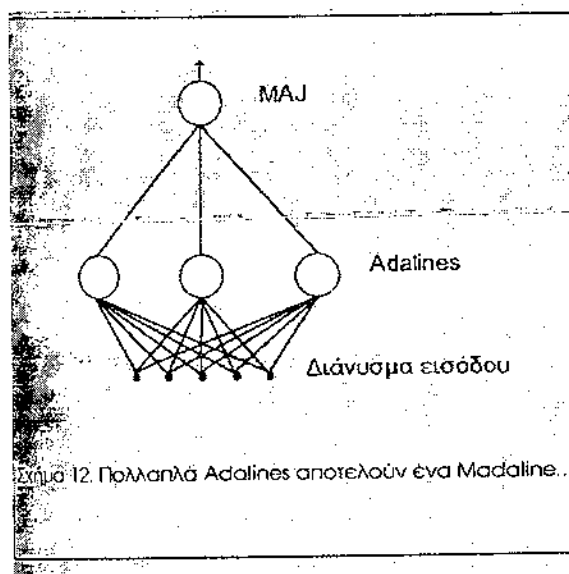
κάποια άλλα γραμμικώς ανεξάρτητα διανύσματα και εν συνεχεία μετατρέπουμε κατάλληλα τα τελευταία έτσι ώστε να εισαχθούν στα Adalines.

Αν η έξοδος του Madaline είναι διαφορετική από την επιθυμητή, τροποποιούμε τα βάρη εκείνου του Adaline που έχει διαφορετική έξοδο από την επιθυμητή του Madaline και

επιπλέον έχει την μικρότερη απόλυτη τιμή σταθμισμένου αθροίσματος εισόδων, όλα τα Adalines. Η μεταβολή πραγματοποιείται σύμφωνα με την [3]. Η σύγκλιση του αλγορίθμου είναι εγγυημένη αν υπάρχει το κατάλληλο σύνολο βαρών.

Τα Adaline και Madaline υπήρξαν από τα πρώτα ΤΝΔ που τροποποιήθηκαν σε πραγματικά προβλήματα. Ο Widrow τα εφάρμοσε με μεγάλη επιτυχία στις τηλεπικοινωνίες (προσαρμοστική καταστολή του θορύβου στις τηλεφωνικές γραμμές) στην κατασκευή προσαρμοζόμενων συστοιχιών κεραιών, την ανάλυση σεισμικών δεδομένων, καθώς και σε

συστήματα ελέγχου. Στις σημαντικές εφαρμογές τους περιλαμβάνονται η πρόβλεψη του καιρού, η αναγνώριση φωνής, η ρύθμιση της πίεσης του αίματος και η ανάλυση του ΗΚΓ.



Σχήμα 12. Πολλαπλά Adalines αποτελούν ένα Madaline.

2.8.3 Brain state in a box (BSB).

Ο τύπος αυτός ΤΝΔ προτάθηκε από τον Anderson. Το BSB είναι ένα αυτοσυσχετιζόμενο ΤΝΔ που αποτελείται από ένα επίπεδο ΤΝ οι οποίοι επεξεργάζονται τα διπολικά διανύσματα εισόδου (οι συνιστώσες τους είναι -1 και +1 όπως και στο Adaline). Η έξοδος κάθε ΤΝ ανατροφοδοτείται στους άλλους ΤΝ του επιπέδου (αλλά και στον ίδιο τον ΤΝ), συνήθως επιλεκτικά και με ασυμμετρικά βάρη. Λειτουργικά το BSB μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα:

- Έναν γραμμικό συσχετιστή.
- Ένα μη γραμμικό τμήμα.

Γραμμικός συσχετιστής.

Η βασική λειτουργία του γραμμικού συσχετιστή είναι η γραμμική συσχέτιση του διανύσματος εισόδου X_k με το διάνυσμα εξόδου OUT_k ως εξής:

$$OUT_k = W_k * X_k \quad [5]$$

Το W_k είναι το διάνυσμα των βαρών. Αν υποθέσουμε ότι:

$$W_k * X_1 = OUT_1 + OUT_{common} \quad [6]$$

$$W_k * X_2 = OUT_{common} + OUT_2 \quad [7]$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις [6] και [7] προκύπτει:

$$W_k * (X_1 + X_2) = OUT_1 + OUT_2 + OUT_{common} \quad [8]$$

Από την [8] παρατηρούμε ότι αν εισάγουμε στο BSB ταυτόχρονα δύο διανύσματα εισόδου, τότε παράγεται κάποιος ενισχυμένος όρος της συσχέτισης τους.

Μη γραμμικό τμήμα.

Εκτός από την γραμμική συσχέτιση, το BSB ενσωματώνει και έναν μη γραμμικό αλγόριθμο, ο οποίος απορρίπτει τις ανεπιθύμητες συνιστώσες του διανύσματος εξόδου που παρήχθησαν από το γραμμικό τμήμα και επιπλέον περιορίζει την δραστηριοποίηση των TN στο διάστημα $(-1,+1)$.

Όπως αναφέραμε το BSB λειτουργεί συνήθως ως αυτοσυσχετιζόμενο ΤΝΔ ($DES_k = X_k$)' Σε αυτή την περίπτωση όταν εισάγουμε κάποιο διάνυσμα $X_k(0)$, αυτό ανατροφοδοτείται από την έξοδο στην είσοδο, μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Κατά την i επανάληψη η νέα έξοδος $X_k(i+1)$ είναι:

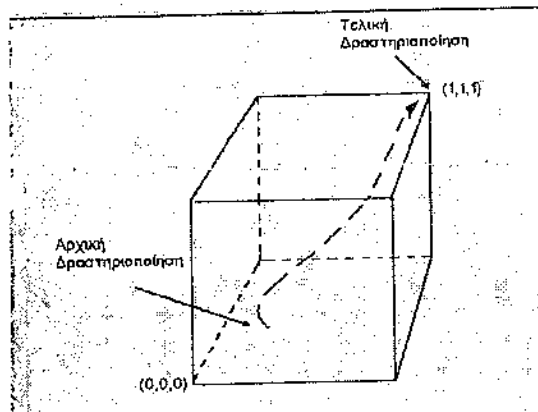
$$X_k(i+1) = LIMIT[a * W_k * X_k(i) + b * X_k(i) + c * X_k(0)] \quad (9)$$

LIMIT: Είναι η συνάρτηση που περιορίζει την τιμή εξόδου των TN στο διάστημα $px(-1,+1)$.

- A. Ρυθμίζει την πληροφορία διασύνδεσης. Επιλέγεται έτσι ώστε μετά από την πρώτη επανάληψη, η δραστηριότητα να βρίσκεται στο εσωτερικό του κύβου.
- B. ρυθμίζει την επίδραση της τρέχουσας εξόδου στην επόμενη χρονικά έξοδο. Πρέπει να ισχύει $b < 1$, έτσι ώστε το σφάλμα συγκλίνει στο 0.
- C. ρυθμίζει την επίδραση του αρχικού διανύσματος εισόδου. Η τιμή του εξαρτάται από την εφαρμογή. Αν το ΤΝΔ είναι αυτοσυσχετιζόμενο τότε πρέπει $c = 1$. περίπου. Για ετεροσυσχετιζόμενο ΤΝΔ $c = 0$.

Επειδή υπάρχει θετική ανάδραση από την τρέχουσα έξοδο στην χρονικά επόμενη έξοδο, το διάνυσμα εξόδου μπορεί να αυξάνει απεριόριστα. Η συνάρτηση περιορισμού LIMIT αναγκάζει την δραστηριοποίηση των TN να περιοριστεί στις "κορυφές" ενός υπερκύβου, τα όρια του οποίου καθορίζονται από αυτήν (Σχήμα 13).

Συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε ως βασικό πλεονέκτημα του BSB, όταν λειτουργεί ως αυτοσυσχετιζόμενο ΤΝΔ την ικανότητα αναπλήρωσης των χαμένων πληροφοριών του διανύσματος εισόδου.



Σχήμα 13. Οι καταστάσεις δραστηριοποίησης του BSB, περιοριζόμενες από την συνάρτηση περιορισμού, βρίσκονται μέσα σε έναν υπερκύβο. Όταν το διάνυσμα των δραστηριοποιήσεων "κτυπήσει" στο τοίχωμα του υπερκύβου, τότε κινείται προς κάποια κορυφή η οποία είναι και η τελική κατάσταση δραστηριοποίησης. Η διάσταση του υπερκύβου είναι ίση με τον a αριθμό των ΤΝ.

2.9 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Η αναγνώριση των μοναδικών χαρακτηριστικών του ανθρώπινου σώματος μπορεί να βοηθήσει στην βελτίωση των μηχανισμών ασφαλείας Τραπεζών, χώρων με περιορισμένη δυνατότητα πρόσβασης κλπ. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα δακτυλικά αποτυπώματα, η ίριδα του ματιού, το πρόσωπο κλπ. Πιο συγκεκριμένα η αναγνώριση κάποιου ατόμου από την ίριδα του ματιού του παρουσιάζει μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα όπως περισσότερες λεπτομέρειες, διαχρονική σταθερότητα των σχηματισμών και αδυναμία μεταβολής τους χωρίς την ταυτόχρονη καταστροφή της όρασης. Η εταιρία IRIS Scan Inc. έχει κατασκευάσει ένα σύστημα βασισμένο σε ΤΝΔ που αναγνωρίζει την ίριδα ενός ατόμου που βρίσκεται σε απόσταση 30-45 εκ. από την κάμερα, εξάγει τα χαρακτηριστικά της και τα συγκρίνει με χαρακτηριστικά που είναι αποθηκευμένα σε μια βάση δεδομένων. Η πιθανότητα λάθος αναγνώρισης του εργαστηριακού πρωτότυπου είναι 1/131000. Η πιθανότητα θετικού ή αρνητικού λάθους αποδοχής μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με την εφαρμογή.

Ένα άλλο σύστημα που χρησιμοποιείται για τον ίδιο σκοπό αναγνωρίζει το πρόσωπο κάποιου ατόμου. Μετά από την ψηφιοποίηση, την αλλαγή κλίμακας, περιστροφή και διόρθωση του φωτισμού, το προς εξέταση πρόσωπο αντικαθίσταται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών που τροφοδοτείται σε ένα πολυεπίπεδο ΤΝΔ. Το ΤΝΔ μπορεί να αποφασίσει σε 1 δευτερόλεπτο εάν το πρόσωπο ταιριάζει σε κάποιο από τα 5000 πρόσωπα στα οποία έχει εκπαιδευτεί να ανταποκρίνεται. Τέλος η πιθανότητα να αναγνωρίσει το ΤΝΔ λανθασμένα πχ. δίδυμα άτομα είναι υπαρκτή αλλά πολύ μικρότερη από αυτήν ενός ανθρώπου. Τέλος το επίπεδο αποδοχής ή

απόρριψης ενός προσώπου μπορεί να ρυθμιστεί πχ. το TND αναγνωρίζει κάποιο πρόσωπο μόνον εάν έχει την ίδια έκφραση.

2.10 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Βασικό χαρακτηριστικό σε όλα τα μοντέλα TND είναι ότι η λειτουργία τους προκύπτει ως αποτέλεσμα της συλλογικής δράσης των νευρώνων που τα απαρτίζουν. Αναλυτικότερα, ένα TND αποτελείται από απλές υπολογιστικές μονάδες(τεχνητοί νευρώνες), τοποθετημένες σύμφωνα με διάφορες αρχιτεκτονικές (π.χ. διάταξη σε επίπεδα), ενωμένες μέσω ποικίλων ειδών διασυνδέσεων, και χρησιμοποιεί αλγόριθμους εκμάθησης για τον καθορισμό των συντελεστών βάρους των διασυνδέσεων των νευρώνων ώστε να επιδεικνύεται η επιθυμητή απόκριση αναφορικά με το σήμα στην είσοδο. Η ευελιξία που χαρακτηρίζει τη σχεδίαση TND περιπλέκει την ταξινόμηση των δικτύων οδηγώντας σε μοντέλα που έχουν μικρή έως καμία σχέση μεταξύ τους. Τα τρία γνωρίσματα των TND, οι υπολογιστικές μονάδες, η αρχιτεκτονική και οι αλγόριθμοι εκμάθησης είναι ανεξάρτητα από το πεδίο εφαρμογής του δικτύου. Συνεπώς, όταν σχεδιάζεται ένα TND για μια συγκεκριμένη εφαρμογή τα χαρακτηριστικά του επιλέγονται με βάση την εμπειρία και όχι ακολουθώντας κάποια μεθοδολογία όπως στον κλασσικό προγραμματισμό.

Τα TND μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που αποτελούν τον πυρήνα ενός νευρωνικού μοντέλου. Έτσι, σε πρώτο επίπεδο τα δίκτυα χωρίζονται με βάση τη συνάρτηση ενεργοποίησης των νευρώνων. Η συνάρτηση αυτή καθορίζει το είδος πληροφορίας που μεταφέρεται από ένα νευρώνα σε έναν άλλο και μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική.

Σε δεύτερο επίπεδο τα δίκτυα ταξινομούνται με βάση το είδος των διασυνδέσεων των νευρώνων. Έτσι, έχουμε δίκτυα με συνδέσμους ανάδρασης (feedback ή recurrent networks) που επιτρέπουν τη ροή πληροφορίας μέσα στο δίκτυο προς οποιαδήποτε, ανάλογα με τη σχεδίαση, κατεύθυνση και δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feedforward networks) στα οποία η πληροφορία ρέει προς μία κατεύθυνση. Ωστόσο τα δίκτυα που έχουν ανάδραση προϋποθέτουν μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης.

Σε ένα τρίτο επίπεδο η ταξινόμηση γίνεται σε σχέση με τον αλγόριθμο εκμάθησης. Εάν τα πρότυπα εισόδου είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους τότε ένας αλγόριθμος εξωτερικού γινομένου (Hebb 1949) χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου, ή την αποθήκευση προτύπων σε αυτό, χωρίς κάποια εξωτερική επέμβαση. Ο αλγόριθμος αυτός, επονομαζόμενος και «κανόνας του Hebb», τροποποιεί τη συσχέτιση (correlation) των ενεργοποιήσεων των νευρώνων και χρησιμοποιείται χωρίς κάποια εξωτερική διόρθωση, ή αλλιώς η εκπαίδευση γίνεται χωρίς επίβλεψη(unsupervised training). Στην περίπτωση που τα πρότυπα εισόδου είναι γραμμικά ανεξάρτητα ένας αλγόριθμος διόρθωσης του σφάλματος εκπαίδευσης (error correcting training algorithm), δηλαδή της διαφοράς πραγματικής και επιθυμητής απόκρισης των νευρώνων, όπως ο κανόνας δέλτα (Widrow-Hoff 1960) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των συντελεστών βάρους. Αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται συνήθως για εκπαίδευση με επίβλεψη(supervised training) καθώς χρειάζονται την επιθυμητή απόκριση των νευρώνων για τον καθορισμό του διορθωτικού όρου. Ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την εκπαίδευση νευρώνων άγνωστης επιθυμητής απόκρισης, η επονομαζόμενη εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη, αφού πρώτα καθοριστεί

ένα εσωτερικό διορθωτικό κριτήριο.

Τέλος η ταξινόμηση σχετίζεται με το αν οι νευρώνες ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το βαθμό ενεργοποίησής τους. Ο ανταγωνισμός δημιουργεί ομάδες νευρώνων που ενισχύουν ο ένας τον άλλον μέσω ανταγωνισμού τους με νευρώνες άλλων ομάδων. Οι παρακάτω πίνακες συνοψίζουν την ταξινόμηση των μοντέλων ΤΝΔ σύμφωνα με τα παραπάνω.

2.11 Η ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΘΗΣΗΣ ΣΤΑ ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Μια από της πλέον σημαντικές ιδιότητες των ΤΝΔ είναι η ικανότητά τους να μαθαίνουν από το περιβάλλον που βρίσκονται και να βελτιώνουν την απόδοσή τους μέσω της διεργασίας μάθησης. Η βελτίωση της απόδοσής γίνεται με το πέρασμα του χρόνου και βελτιστοποιώντας ένα προκαθορισμένο κριτήριο. Το ΤΝΔ μαθαίνει για το περιβάλλον στο οποίο είναι ενταγμένο μέσω επαναληπτικών ρυθμίσεων των βαρών. Στην ιδανική περίπτωση, το δίκτυο αυξάνει τις γνώσεις του για το περιβάλλον μετά από κάθε επανάληψη της διαδικασίας εκπαίδευσης.

Επομένως μπορούμε να ορίσουμε ως μάθηση στα ΤΝΔ τη διεργασία κατά την οποία οι παράμετροι (συντελεστές βάρους) του νευρωνικού συστήματος προσαρμόζονται μέσω της επαναλαμβανόμενης διέγερσης του δικτύου από το περιβάλλον στο οποίο έχει ενταχθεί και σκοπό έχει να οργανώσει το δίκτυο ώστε να έχει την επιθυμητή απόκριση αναφορικά με το σήμα στην είσοδό του. Ο τρόπος που οι παράμετροι προσαρμόζονται καθορίζει τον τύπο της διεργασίας μάθησης: όταν οι παράμετροι προσαρμόζονται με κάθε είσοδο που λαμβάνει το δίκτυο ονομάζεται μάθηση ανά πρότυπο εισόδου (pattern learning) ή μάθηση επί γραμμής (on-line learning); όταν η προσαρμογή γίνεται μετά από παρουσίαση υποσυνόλου των εισόδων ονομάζεται μάθηση ανά ομάδα προτύπων (batch learning) ή μάθηση εκτός γραμμής (off-line learning).

Η διεργασία μάθησης βασίζεται σε διάφορες μεθόδους εκπαίδευσης, στην ουσία τεχνικές αναζήτησης ή εκτίμησης παραμέτρων, όπως επαναληπτικές, μη παραμετρικές, ή μη γραμμικές τεχνικές (Hinton 1987) και μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα υπολογιστικής πολυπλοκότητας (Judd 1987, Blum and Rivest 1989). Είναι επίσης σημαντικό η μάθηση να διεξάγεται όπως στα βιολογικά συστήματα, δηλαδή χωρίς αντιπροσωπευτικά δεδομένα και αναλυτική γνώση του στοχαστικού χαρακτήρα του περιβάλλοντος. Ειδικότερα η διεργασία μάθησης εκτελείται υπό τις εξής συνθήκες:

- Τα δεδομένα είναι συνεχώς διαθέσιμα αλλά η παρεχόμενη πληροφορία είναι ελλιπής. Η προσαρμογή των παραμέτρων γίνεται χρησιμοποιώντας δεδομένα που αντιπροσωπεύουν ένα πολύ μικρό δείγμα του χώρου των εισόδων.

- Η υπό συνθήκη πιθανότητα των επιθυμητών κατηγοριοποιήσεων ως προς τα ερεθίσματα (δεδομένα εισόδου) και τα χαρακτηριστικά τους είναι άγνωστη και πρέπει να εκτιμηθεί από δείγματα ερεθισμάτων που μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά.

- Η διαθέσιμη πληροφορία έχει τοπικό χαρακτήρα στο χρόνο (local information in time), δηλαδή βασίζεται σε παρατηρήσεις της τρέχουσας χρονικής στιγμής, και μπορεί να περιέχει μεγάλο ποσοστό λάθους. Από την άλλη, η συγκέντρωση περισσότερων παρατηρήσεων, πιθανότατα εσφαλμένων, μπορεί να οδηγήσει σε μη αναστρέψιμες μεταβολές των παραμέτρων.

Οι παραπάνω συνθήκες δρουν περιοριστικά για τη διεργασία μάθησης στους βιολογικούς οργανισμούς και αυξάνουν το ενδιαφέρον για μεθόδους εκπαίδευσης

ΤΝΔ που απαιτούν ελάχιστη γνώση του περιβάλλοντος. Ένα σύστημα με έμφυτη πληροφορία σχετικά με την πυκνότητα πιθανότητας και τα στατιστικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος του έχει ασφαλώς πλεονεκτήματα, όπως συμβαίνει με ορισμένα έντομα που ζουν σε αυστηρά οργανωμένο περιβάλλον, χωρίς ποικιλία ή επιδεικνύουν περιορισμένο ρεπερτόριο συμπεριφορών. Στην πραγματικότητα ωστόσο, η ποικιλία στο περιβάλλον και στα δεδομένα απαιτεί τροποποίηση της πληροφορίας με δυναμικό τρόπο. Η έμφυτη πληροφορία του εγκεφάλου συνδέεται με γενικές αμετάβλητες ιδιότητες του κόσμου, όπως οι τρεις διαστάσεις, το επίπεδο διακύμανσης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ή ο κύκλος μέρας-νύκτας και όχι με συγκεκριμένες δραστηριότητες, όπως το να παίζεις τένις ή να μιλάς (Shepard 1987).

2.12. ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΒΑΡΩΝ

Σε ένα ΤΝΔ αποτελούμενο από N νευρώνες, με βάρη που προσαρμόζονται από μια μέθοδο εκπαίδευσης, μπορεί να οριστεί το διάνυσμα βαρών του δικτύου. Το διάνυσμα αυτό δημιουργείται όταν συγκεντρωθούν όλα τα βάρη όλων των νευρώνων του δικτύου. Για να διατηρηθεί η απλότητα των συμβολισμών θεωρείται ότι όλα τα βάρη του δικτύου είναι πραγματικοί αριθμοί, και ότι κάθε νευρώνας έχει n βάρη. Το διάνυσμα βαρών του δικτύου μπορεί να γραφεί στην παρακάτω μορφή:

Οι διανύσματα W_1, W_2, W_N είναι τα διανύσματα βαρών των N νευρώνων του δικτύου. Τα διανύσματα αυτά ορίζονται όπως παρακάτω: όπου n είναι ο αριθμός των βαρών που έχει ο νευρώνας i .

$$W = (W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1n}, W_{21}, W_{22}, \dots, W_{2n}, \dots, W_{N1}, W_{N2}, \dots, W_{Nn}) = (W_{11}, W_{21}, \dots, W_{N1}, W_{12}, W_{22}, \dots, W_{N2}, \dots, W_{1n}, W_{2n}, \dots, W_{Nn})$$

Οι διανύσματα W_1, W_2, W_N είναι τα διανύσματα βαρών των N νευρώνων του δικτύου. Τα διανύσματα αυτά ορίζονται όπως παρακάτω: όπου n είναι ο αριθμός των βαρών που έχει ο νευρώνας i .

Σημειώνεται πως το διάνυσμα w των βαρών του δικτύου ορίζει ένα σημείο στον Ευκλείδειο χώρο των βαρών W που έχει διάσταση $q = N \times n$.

Αρχικά μοιάζει αφύσικο να ορίζουμε το διάνυσμα w , το οποίο απαρτίζεται από βάρη που ανήκουν σε διακεκριμένους και πιθανώς ανόμοιους νευρώνες. Ωστόσο, το πλεονέκτημα για να χρησιμοποιούμε το w είναι πως το σύνολο όλων των πιθανών w διανυσμάτων ορίζει το σύνολο όλων των πιθανών συνδυασμών επεξεργασίας πληροφορίας του δικτύου (θεωρώντας τα βάρη ως τα μόνα προσαρμοζόμενα στοιχεία του δικτύου). Αυτό σημαίνει πως η επιθυμητή συμπεριφορά που αναζητούμε σε ένα δίκτυο επιτυγχάνεται με κάποια τιμή του διανύσματος w . Επομένως, σκοπός μιας μεθόδου εκπαίδευσης είναι να φέρει το w σε κατάλληλη θέση στο χώρο ώστε το δίκτυο με αυτές τις τιμές βαρών να επιδεικνύει την επιθυμητή συμπεριφορά.

Οι περισσότερες μέθοδοι εκπαίδευσης έχουν αναπτυχθεί με σκοπό να βελτιστοποιούν κάποιο κριτήριο απόδοσης της διεργασίας μάθησης (performance learning). Συνήθως διαδοχικές προσαρμογές του w αποφέρουν μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση ενός ολικού κριτηρίου κόστους του δικτύου ή μιας συνάρτησης σφάλματος, όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, ή το σφάλμα ταξινόμησης ανά πρότυπο εισόδου.

2.13 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΚΜΑΘΗΣΗ

Η παρατήρηση ότι η διεργασία μάθησης βασίζεται στην προσαρμογή ενός συστήματος, ώστε να ικανοποιείται κάποιο κριτήριο, επιτρέπει τη μελέτη της ανεξάρτητα από το προσαρμοστικό σύστημα.

Με τον όρο θεωρία εκμάθησης εννοούμε τη μαθηματική θεωρία που περιγράφει τη διεργασία μάθησης. Η ύπαρξη μιας τέτοιας θεωρίας είναι απαραίτητη για τον καθορισμό αρχών που θα αποτελέσουν τη βάση για την αναζήτηση ικανοποιητικών λύσεων σε συγκεκριμένα προβλήματα.

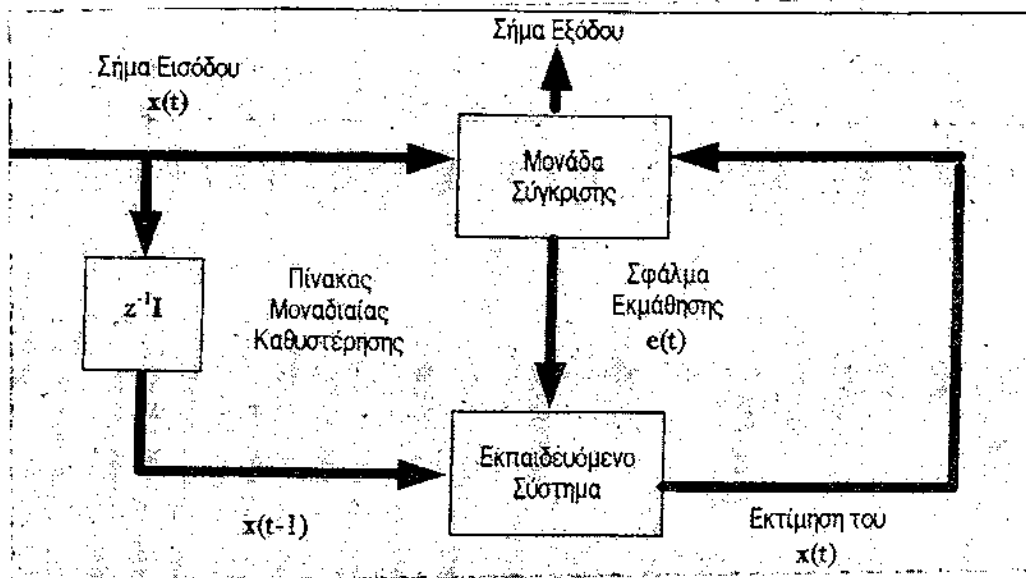
Όταν ένα ΤΝΔ λειτουργεί σε περιβάλλον που χαρακτηρίζεται ως στάσιμο, μπορεί θεωρητικά να μάθει με επίβλεψη, τα ουσιώδη χαρακτηριστικά αυτού του περιβάλλοντος. Τα βάρη του δικτύου υπολογίζονται μέσω της διαδικασίας εκπαίδευσης χρησιμοποιώντας ένα σύνολο αντιπροσωπευτικών δεδομένων του περιβάλλοντος. Με το πέρας της εκπαίδευσης, τα βάρη έχουν συλλάβει τα στατιστικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και το δίκτυο λειτουργεί σε μνήμη από την οποία ανακαλείται εμπειρία σχετική με το περιβάλλον.

Στην περίπτωση που το ΤΝΔ βρίσκεται σε περιβάλλον που χαρακτηρίζεται ως μη στάσιμο, οι κλασικές μέθοδοι μάθησης με επίβλεψη μπορεί να αποδειχθούν ανεπαρκείς, εξαιτίας του ότι το δίκτυο δεν είναι εξοπλισμένο με τα απαραίτητα μέσα για την παρακολούθηση των μεταβολών των στατιστικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος στο οποίο εντάσσεται και λειτουργεί. Για το λόγο αυτό το δίκτυο πρέπει συνεχώς να προσαρμόζει τις ελεύθερες παραμέτρους του στις μεταβολές των σημάτων εισόδου όπως μια διεργασία πραγματικού χρόνου. Έτσι, όπως ένα προσαρμοστικό σύστημα το ΤΝΔ αποκρίνεται σε κάθε διαφορετική είσοδο μοναδικό τρόπο. Ας σημειωθεί πως, όταν ένα σύστημα λειτουργεί σε μη στάσιμο περιβάλλον, αύξηση της προσαρμοστικότητάς του (με τρόπο πλήρως ελεγχόμενο) ισοδυναμεί με βελτίωση της απόδοσής του. Ο άνθρωπος αποτελεί ζωντανό παράδειγμα

συστήματος με αυξημένη προσαρμοστικότητα, ικανού να λειτουργεί σε συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Για να μελετηθεί ο τρόπος που ένα ΤΝΔ προσαρμόζει τη συμπεριφορά του στο χρονικό χαρακτήρα των σημάτων που λαμβάνει από το περίβάλλον μπορούμε να ανατρέξουμε σε ιδέες από το χώρο των προσαρμοστικών συστημάτων (Haykin 1991, Astrom 1983).

Το, Σχήμα 1.3 μας δείχνει ένα μοντέλο αυτής της προσαρμογής.



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα ενός προσαρμοστικού συστήματος.

Το ΤΝΔ λειτουργεί όπως μια μονάδα πρόβλεψης, χρησιμοποιεί προηγούμενη εμπειρία για να προβλέψει τι ακολουθεί. Πιο συγκεκριμένα, το ΤΝΔ βασίζεται σε προηγούμενες τιμές (υπολογισμένες τη χρονική στιγμή $t-1$) του σήματος εισόδου $x(t-1)$ και των βαρών $w(t-1)$ για να δώσει μια εκτίμηση $x(t)$ του πραγματικού διανύσματος εισόδων $x(t)$. Η μονάδα σύγκρισης υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής του διανύσματος εισόδων και της εκτίμησής της, δηλαδή το $x(t)$ θεωρείται σαν το επιθυμητό διάνυσμα αποκρίσεων του δικτύου. Το σήμα διαφοράς συμβολίζεται $e(t)$ καλείται σφάλμα εκμάθησης και παριστά τη νέα πληροφορία που περιέχεται στο σήμα εισόδου $x(t)$ τη χρονική στιγμή του υπολογισμού. Στην περίπτωση που το $e(t)$ είναι μηδέν, αυτό σημαίνει πως το ΤΝΔ ήδη γνωρίζει τι θα ακολουθήσει και επομένως δε χρειάζεται να προσαρμοστεί. Στην αντίθετη περίπτωση το δίκτυο πρέπει να προσαρμοστεί στην άγνωστη είσοδο. Το σφάλμα εκμάθησης έχει διπλή χρησιμότητα:

1. Παρέχει ένα διορθωτικό σήμα στο δίκτυο. Το δίκτυο χρησιμοποιεί αυτό το σήμα για την προσαρμογή των βαρών. Η διεργασία εκμάθησης στο ΤΝΔ επιτυγχάνεται με το βρόγχο ανάδρασης από τη μονάδα, σύγκρισης προς το δίκτυο. Έτσι η παρακολούθηση των στατιστικών μεταβολών του περιβάλλοντος πραγματοποιείται με την προσαρμογή του διανύσματος των βαρών w όπως παρακάτω:

$$W(t) = W(t-1) + \Delta W(t)$$

Ο όρος ΔW , ονομάζεται διάνυσμα διόρθωσης των βαρών και είναι μια συνάρτηση του σφάλματος εκμάθησης.

2. Μεταφέρεται από επίπεδο σε επίπεδο όπως κάθε σήμα προς επεξεργασία. Προχωρώντας από επίπεδο σε επίπεδο η πληροφορία που επεξεργάζεται το δίκτυο γίνεται ολοένα σημαντικότερη, επειδή κάθε επίπεδο επεξεργάζεται μόνο την πληροφορία εκείνη που δε μπόρεσαν να επεξεργαστούν κατώτερα επίπεδα. Το μοντέλο του Σχήματος 1.3 χρησιμοποιήθηκε από τον Mead (1990) για την περιγραφή της προσαρμοστικότητας του αμφιβληστροειδούς χιτώνα του ματιού. Σε αυτή την εφαρμογή, η διαφορά ανάμεσα σε πραγματικά χαρακτηριστικά της λαμβανόμενης εικόνας και στις εκτιμήσεις τους, που είναι αποτέλεσμα της εμπειρίας του νευρωνικού δικτύου, στέλνεται για επεξεργασία στα υψηλότερα επίπεδα του μοντέλου του προσαρμοζόμενου αμφιβληστροειδή.

Το παραπάνω μοντέλο επιτρέπει την ερμηνεία της διεργασίας μάθησης σε εφαρμογές αναγνώρισης προτύπων αλλά και σε εφαρμογές που εξαρτώνται από το χρόνο. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα να δούμε τα ΤΝΔ από τη σκοπιά των μη γραμμικών προσαρμοστικών φίλτρων, που αποτελούν μια γενίκευση των γραμμικών προσαρμοστικών φίλτρων (Gabor 1960, King και Magoulas 1993).

2.14 Η ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΜΕ ΕΠΙΒΛΕΨΗ ΩΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η εκπαίδευση των ΤΝΔ μπορεί να αντιμετωπιστεί από τη σκοπιά της βελτιστοποίησης μη γραμμικών συναρτήσεων χωρίς περιορισμούς. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η συνάρτηση σφάλματος ορίζεται βάση των αποκλίσεων των εξόδων του ΝΔ από τις επιθυμητές τιμές και εκφράζεται συναρτήσει του διανύσματος βαρών που απαρτίζεται από τις ελεύθερες παραμέτρους του δικτύου. Σκοπός της διαδικασίας εκπαίδευσης είναι η προσαρμογή των ελεύθερων παραμέτρων ώστε οι πραγματικές έξοδοι του ΤΝΔ να προσεγγίσουν τις επιθυμητές εξόδους στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Η διαδικασία αυτή είναι ανάλογη της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης σφάλματος.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης και πιο συγκεκριμένα ελαχιστοποίησης συναρτήσεων, αποτελούν σημαντικό και εκτεταμένο πεδίο έρευνας. Επομένως, η προσέγγιση αυτή στο πρόβλημα της εκπαίδευσης των ΤΝΔ εκμεταλλεύεται την ανάπτυξη μιας μεγάλης ερευνητικής περιοχής. Επιπλέον, η θεώρηση και ανάλυση των αλγορίθμων ελαχιστοποίησης υπό ρεαλιστικές συνθήκες που αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία ενίσχυσε την εμπιστοσύνη του χρήστη στην αποτελεσματικότητά τους, ενώ η ποικιλία και η πληρότητα των διαθέσιμων θεωρητικών αποτελεσμάτων καθιστά τη βελτιστοποίηση συναρτήσεων που δεν υπόκειται σε περιορισμούς ως ένα πλήρως ανεπτυγμένο πεδίο της αριθμητικής ανάλυσης.

Όστόσο υπάρχουν ακόμα πολλά ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν, πολλά από τα οποία είναι θεμελιώδη. Το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης αλγορίθμων εστιάζεται στη μελέτη της ολικής σύγκλισης και του ρυθμού σύγκλισης, ενώ πολύ λίγα είναι γνωστά σχετικά με τη μέση συμπεριφορά, τη χειρότερη πιθανή συμπεριφορά και την επίδραση των σφαλμάτων στρογγύλευσης. Επιπλέον δεν υπάρχουν θεωρητικά, ή έστω πρακτικά εργαλεία εκτίμησης της απόδοσης των αλγορίθμων σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας, όπως η εκπαίδευση των ΤΝΔ.

Τα παραπάνω ασφαλώς επηρεάζουν θεωρητική μελέτη των αλγορίθμων εκμάθησης για την εκπαίδευση ΤΝΔ με επίβλεψη. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση της σύγκλισης των αλγορίθμων εκμάθησης εξηγεί τη συμπεριφορά και την απόδοση των

αλγορίθμων κατά την εκπαίδευση των ΤΝΔ στις διάφορες εφαρμογές και εμπίπτει σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες.

- **Ολική σύγκλιση.** Ανάλυση αυτής της κατηγορίας απαντά στο ερωτήματα εάν ο αλγόριθμος εκμάθησης συγκλίνει πάντα σε ένα ελάχιστο καθώς και στο ερώτημα εάν για 'μια οποιαδήποτε αρχική τιμή του διανύσματος βαρών ο αλγόριθμος συγκλίνει στο κοντινότερο ελάχιστο.

- **Τοπική σύγκλιση.** Μελετά εάν υπάρχει γειτονία ενός ελαχίστου καθώς και τιμές βαρών του δικτύου για τις οποίες ο αλγόριθμος εκμάθησης έχει εγγυημένη σύγκλιση σε ένα ελάχιστο της συνάρτησης σφάλματος.

- **Ασυμπτωτικός ρυθμός σύγκλισης.** Δίνει την ταχύτητα του αλγορίθμου εκμάθησης καθώς συγκλίνει σε ένα ελάχιστο. Η ταχύτητα αυτή δε συνδέεται απαραίτητα με την ταχύτητα του αλγορίθμου μακριά από το ελάχιστο.

- **Ολική απόδοση ή ολικός ρυθμός σύγκλισης.** Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μέτρησής της. Ένας από αυτούς εκτιμά την ελάττωση της συνάρτησης σφάλματος με κάθε επανάληψη. Μια άλλη προσέγγιση είναι η μελέτη της ολικής συμπεριφοράς των μεθόδων στη χειρότερη των περιπτώσεων (worst case behavior).

Το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας αλγορίθμων εκμάθησης καλύπτει αναλύσεις που ανήκουν στις τρεις πρώτες κατηγορίες σύγκλισης (Battiti 1992, van der Smagt 1994, Baba et al. 1994, Ellacott 1994, Magoulas et al. 1997a). Αποτελέσματα σχετικά με την ολική απόδοση ενός αλγορίθμου είναι πολύ χρήσιμα αλλά δύσκολο να εξαφανιστούν. Στην πλειονότητα των αλγορίθμων οι αποδείξεις σύγκλισης στηρίζονται στην υπόθεση της κυρτότητας της συνάρτησης σφάλματος (convexity) ή της τετραγωνικότητάς της (quadratic error function).

Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση των σφαλμάτων στρογγύλευσης και του θορύβου στη διαδικασία ελαχιστοποίησης (Hamming 1971) της συνάρτησης σφάλματος του ΤΝΔ.

2.15 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΝΔ.

Η προσέγγιση ότι η εκπαίδευση με επίβλεψη αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος, οδηγεί στην ανάπτυξη αλγορίθμων εκμάθησης που βασίζονται στη βιβλιογραφία της αριθμητικής βελτιστοποίησης και ιδιαίτερα σε τεχνικές, που χρησιμοποιούν πληροφορία σχετική με τη συνάρτηση σφάλματος, όπως η μέθοδος συζυγών κλίσεων και η μέθοδος του Newton (Luenberger 1969, Ortega και Reiribolát1970). Οι δύο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιούν, μολονότι με διαφορετικό τρόπο το διάνυσμα των μερικών παραγώγων πρώτης τάξης και την Εσσιανή (δεύτερης τάξης μερικές παράγωγοι) της συνάρτησης σφάλματος.

Στην εργασία του Battiti (1992) παρουσιάζεται μια επισκόπηση τεχνικών βελτιστοποίησης με χρήση παραγώγων πρώτης και δεύτερης τάξης που εφαρμόζονται για εκπαίδευση των ΤΝΔ με επίβλεψη. Περιγραφή σε ψευδοκώδικα των μεθόδων που καταγράφονται παρακάτω υπάρχει στις εργασίες των Beigi et al. (1993), Moller (1993) και van der Smagt (1994), καθώς και στα βιβλία των Kung (1993) και Haykin (1994).

- **Η μέθοδος μέγιστης κλίσης (steepest descent) και οι τροποποιήσεις της.** Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από πολύ καλή απόδοση όταν οι αρχικές τιμές του διανύσματος βαρών είναι μακριά από το ελάχιστο, κάτι που ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις εκπαίδευσης των ΤΝΔ. Ωστόσο, η σύγκλισή της στην περιοχή του ελαχίστου χαρακτηρίζεται από εξαιρετική βραδύτητα. Σημαντικοί

περιορισμοί για τη χρήση της μεθόδου στα ΤΝΔ είναι η αδυναμία της για εγγύηση σύγκλισης στο ολικό ελάχιστο καθώς και η χρήση σταθερού μήκους βήματος που πολλές φορές εμποδίζει τη σύγκλιση ακόμα και σε ένα τοπικό ελάχιστο και δεν εγγυάται τη μείωση της συνάρτησης σφάλματος σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου εκμάθησης.

- **Η μέθοδος συζυγών κλίσεων (conjugate gradient) και οι επεκτάσεις της.**

Η εκπαίδευση των ΤΝΔ σε πολλές εφαρμογές απαιτεί την προσαρμογή αρκετών εκατοντάδων ή ακόμα χιλιάδων βαρών. Οι μέθοδοι συζυγών κλίσεων μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα μεγάλης κλίμακας και να τεθούν σε εφαρμογή σε υπολογιστές πολλαπλών επεξεργαστών. Αρκετοί αλγόριθμοι εκμάθησης βασισμένοι σε αυτές τις μεθόδους έχουν παρουσιαστεί (Battiti 1989, Kramer και Sangiovanni-Vincentelli 1989, Moller 1990) και τα αποτελέσματα δείχνουν αυξημένη ταχύτητα εκμάθησης σε σχέση με τις μεθόδους μέγιστης κλίσης. Ωστόσο, χρησιμοποιούν ευθύγραμμη ανίχνευση (line search) για τον καθορισμό του κατάλληλου μήκους βήματος αυξάνοντας την υπολογιστική πολυπλοκότητα της διεργασίας μάθησης με αρκετούς υπολογισμούς της συνάρτησης του ολικού τετραγωνικού σφάλματος εκμάθησης ή των παραγώγων της ενώ η απόδοσή τους εξαρτάται από την ακρίβεια της ευθύγραμμης ανίχνευσης (Johansson et al. 1990). Χαρακτηριστικών μεθόδων είναι ότι δεν ακολουθούν πάντα κατευθύνσεις μείωσης (descent directions) του σφάλματος με αποτέλεσμα να εμφανίζεται αριθμητική αστάθεια. Επιπλέον αποτυγχάνουν όταν τα αρχικά βάρη είναι μακριά από το επιθυμητό ελάχιστο (συνηθισμένο φαινόμενο στα ΤΝΔ) εξαιτίας του ότι η Εσσιανή δεν είναι θετικά ορισμένη σε διάφορες περιοχές του χώρου των βαρών.

- **Η μέθοδος Newton.** Η μέθοδος Newton θεωρείται ως η βασικότερη μέθοδος εύρεσης τοπικού ελαχίστου με χρήση παραγώγων δεύτερης τάξης όταν οι αρχικές τιμές του διανύσματος παραμέτρων είναι κοντά στο ελάχιστο. Η χρήση της στα ΤΝΔ περιορίζεται από το γεγονός ότι απαιτεί γνώση της Εσσιανής, αναλυτικός υπολογισμός της οποίας είναι πολύπλοκος και κοπιαχτικός για ΤΝΔ με περισσότερα από εκατό βάρη. Ακόμα και στην περίπτωση που η Εσσιανή είναι διαθέσιμη, η αντιστροφή της παραμένει μια χρονοβόρα διαδικασία που τις περισσότερες φορές επιβαρύνει τη διαδικασία εκπαίδευσης πιο πολύ από μερικές ακόμα επαναλήψεις μιας απλούστερης μεθόδου. Επιπλέον μειονεκτήματα αποτελούν η πολυπλοκότητά της ανά επανάληψη (ανάλογη του κύβου των παραμέτρων του δικτύου) και η υπόθεση της θετικά ορισμένης Εσσιανής [στα ΤΝΔ η Εσσιανή μπορεί να είναι αρνητικά ορισμένη, να έχει μηδενική οριζούσα (singular) ή ακόμα να έχει μεγάλο συντελεστή αστάθειας (ill-conditioned)].

- **Η μέθοδος μεταβλητής μετρικής Broyden – Fletcher – Goldfarb Shanno (BFGS)**

Η μέθοδος αυτή έχει καλές ιδιότητες σύγκλισης, τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά. Υπολογίζει μια προσέγγιση της Εσσιανής, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα σε σχέση με τη μέθοδο Newton. Επιπλέον η Εσσιανή της ορίζεται θεωρητικά ως συμμετρική και θετικά ορισμένη κάτι που εγγυάται την αριθμητική ευστάθεια του αλγορίθμου. Ο Watrous (1987) εφάρμοσε για πρώτη φορά αυτή τη μέθοδο στην εκπαίδευση των ΤΝΔ. Πέτυχε να επιταχύνει τη διαδικασία εκπαίδευσης σε σχέση με τις μεθόδους μέγιστης κλίσης και συζυγών κλίσεων, ωστόσο η υπολογιστική πολυπλοκότητα της BFGS είναι σημαντικά υψηλότερη της μεθόδου μέγιστης κλίσης αφού εκτελεί ευθύγραμμη ανίχνευση όπως η μέθοδος συζυγών κλίσεων, ενώ οι υπολογισμοί που εκτελούνται (υπολογισμός της κατεύθυνσης, αντιστροφή Εσσιανής, υπολογισμός λύσης) είναι ανάλογοι του τετραγώνου των βαρών. Πέρα από τα

υπολογιστικά προβλήματα, σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου στα ΤΝΔ είναι ότι ο απαιτούμενος χώρος μνήμης για την αποθήκευση της Εσσιανής εξαρτάται από το τετράγωνο του αριθμού των βαρών του δικτύου κάτι που καθιστά την εφαρμογή της προβληματική για ΤΝΔ με μερικές εκατοντάδες βάρη. Επίσης στην πράξη είναι δύσκολο να αντιστραφεί η Εσσιανή μια και ο χρόνος που απαιτείται είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, μεγαλύτερος από αυτόν που χρειάζεται για μερικές ακόμα επαναλήψεις της μεθόδου μέγιστης κλίσης. Παρόμοια συμπεράσματα παρουσιάστηκαν και σε άλλες εργασίες (Battiti και Masulli 1990, van der Smagt 1994). Παρόλα αυτά η μέθοδος παραμένει ανταγωνιστική όταν ο αριθμός των προτύπων προς εκμάθηση είναι πολύ μεγάλος. Τότε ο υπολογισμός της συνάρτησης σφάλματος είναι κοπιώδης και η ταχύτητα μείωσης του σφάλματος εκμάθησης παίζει το σπουδαιότερο ρόλο.

• **Η μέθοδος BFGS με περιορισμένη μνήμη για προβλήματα μεγάλης κλίμακας.** Αν και το πρόβλημα της διαθέσιμης μνήμης αποθήκευσης δεν είναι πλέον τόσο σημαντικό όσο πριν μια δεκαετία, η μέθοδος αυτή, που ομοιάζει της μεθόδου BFGS, αποφεύγει την αποθήκευση των πινάκων και έτσι είναι πιο εύχρηστη σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας (Liu and Nocedal 1989, Kung 1993). Ο Battiti (1990, 1992) στηριζόμενος σε αυτή τη μέθοδο και αναγνωρίζοντας ότι το υπολογιστικό κόστος παραμένει εξαιρετικά υψηλό για δίκτυα με περισσότερα από εκατό βάρη πρότεινε μια τροποποίησή της με πολυπλοκότητα ανάλογη του αριθμού των βαρών. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μάθηση ανά ομάδα προτύπων, κάτι που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για τη χρήση της, ενώ η ταχύτητα εκπαίδευσης βελτιώνεται σε σχέση με τη μέθοδο μέγιστης κλίσης μόνο στην περίπτωση που απαιτείται υψηλή ακρίβεια στην εύρεση της λύσης. Στην πράξη ωστόσο, η ακριβής εύρεση του ελαχίστου, αντιστοιχεί σε απομνημόνευση του συνόλου των προτύπων και σε πολλές εφαρμογές περιορίζει την ικανότητα γενίκευσης του ΤΝΔ.

2.16 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΤΝΔ

Τα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές ως εναλλακτικός τρόπος επίλυσης πολλών προβλημάτων. Τέτοια προβλήματα είναι:

- Η βελτιστοποίηση διαδικασιών (optimisation).
- Η αναγνώριση προτύπων (pattern recognition).
- Η επεξεργασία σήματος (signal processing).
- Το προσαρμοστικό φιλτράρισμα (adaptive filtering).
- Η συμπίεση δεδομένων (data compression).
- Η αναγνώριση και επεξεργασία της ανθρώπινης φωνής.
- Η επεξεργασία εικόνας.

Ακόμη τα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται:

- Στην διαλεύκανση των μηχανισμών που διέπουν την λειτουργία του εγκεφάλου και ιδιαίτερα στην ανάλυση της αισθητικότητας και της κινητικότητας αλλά και την ερμηνεία γνωστικών και ψυχολογικών φαινομένων.
- Στην επεξεργασία βιοηλεκτρικών σημάτων (ΗΚΓ, ΗΕΓ, ΗΜΓ).

- Στην ανάλυση των μηχανισμών της όρασης και την επεξεργασία ιατρικής εικόνας.
- Άλλες εφαρμογές (βιολογία, βιοχημεία, κλινική πράξη).

2.17 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΤΝΔ

Τα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται ως μοντέλα του πραγματικού κόσμου (συναρτήσεων) διότι μπορούν να προβλέπουν ή να ελέγχουν. Πολλές βιομηχανικές διεργασίες όπως η χύτευση, η πρόβλεψη φορτίων ισχύος και η καταστολή θορύβου εμπίπτουν σε αυτή κατηγορία προβλημάτων.

Η ικανότητα προσαρμογής και η μη γραμμική συμπεριφορά αποτελούν δύο από τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά των ΤΝΔ. Η πρώτη συνεπάγεται ότι το ΤΝΔ μπορεί να προσεγγίσει κάποια συνάρτηση, ακόμη και αν η εξίσωση που την περιγράφει είναι άγνωστη. Η μόνη απαίτηση είναι να υπάρχει ικανός αριθμός δειγμάτων της συνάρτησης. Επομένως τα ΤΝΔ μπορεί να διαχειριστούν κάποιο σύστημα με χρήση μόνον της παρατηρημένης συμπεριφοράς του και όχι της θεωρητικής κατανόησης του.

Πίνακας 7. Ορισμένες από τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα ΤΝΔ. Μερικές από αυτές βρίσκονται σε λειτουργικό στάδιο. Άλλες βρίσκονται υπό ανάπτυξη και άλλες στο στάδιο διερεύνησης των δυνατοτήτων εφαρμογής των ΤΝΔ.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΞΟΔΟΥ
Πρόβλεψη καιρικών συνθηκών	Υψος βροχής Θερμοκρασία Πίεση	Υψος βροχής Θερμοκρασία Πίεση
Οικονομική ανάλυση	Τάσεις οικονομικών μεγεθών Δεδομένα	Πρόβλεψη οικονομικών μεγεθών Εκτίμηση οικονομικών μεγεθών
Αποτίμηση υποθήκης για λήψη δανείων	Δεδομένα για την λήψη δανείου	Εγκριση/Απόρριψη της αίτησης
Ταξινόμηση εικόνων	Δεδομένα εικόνων	Κατηγορίες εικόνων
Αυτόματη αναγνώριση στόχου	Εικόνα του στόχου	Αναγνώριση του στόχου
Συμπλήρωση κατεστραμμένης εικόνας	Μερικώς κατεστραμμένη εικόνα	Συμπληρωμένη εικόνα
Βιομηχανικός έλεγχος	Εικόνα εξαρτημάτων	Διαχωρισμός ελαττωματικού εξαρτήματος

ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΞΟΔΟΥ
Διάγνωση	Αποτελέσματα διαγνωστικών ελέγχων Δεδομένα από αισθητήρες	Διάγνωση Εκτίμηση σφαλμάτων
Δερματολογική διάγνωση	Δερματολογικά συμπτώματα	Διάγνωση δερματολογικής ασθένειας
Έλεγχος λειτουργίας στροβιλοκινητήρα	Δεδομένα από τους αισθητήρες του κινητήρα	Εξακρίβωση σφάλματος
Έλεγχος κινητήρα αυτοκινήτων	Δεδομένα από τους αισθητήρες του κινητήρα	Εξακρίβωση σφάλματος
Έλεγχος ρομπότ	Οπτικοί αισθητήρες Επιθυμητή θέση στον χώρο	Εντολές μηχανικού βραχίονα
Αναγνώριση φωνημάτων	Ανεξάρτητα φωνήματα	Αναγνώριση και ταξινόμηση φωνήματος
Αναγνώριση φυσικής ομιλίας	Προφορικές λέξεις	Αναγνώριση λέξεως Γραπτό κείμενο
Μετατροπή κειμένου σε ομιλία	Γραπτό κείμενο	Φωνητικοί χαρακτήρες για να προφερθούν
Διαχωρισμός σημάτων	Επιστρεφόμενο σήμα	Ταξινόμηση στόχου
Κωδικοποίηση και συμπίεση	Εικόνα ή άλλα δεδομένα	Η ίδια εικόνα ή δεδομένα (το κρυφό επίπεδο περιέχει την κωδικοποιημένη αναπαράσταση της εισόδου)

Τα πραγματικά συστήματα συνήθως διαθέτουν γνωστές ή τις περισσότερες φορές, άγνωστες μη γραμμικές ιδιότητες. Πολλές γραμμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε μη γραμμικά προβλήματα με περιορισμένη βέβαια επιτυχία. Εδώ μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά τα ΤΝΔ με τις ενσωματωμένες μη γραμμικές ικανότητες τους.

Στην συνέχεια θα περιγράψουμε ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής των ΤΝΔ σε πρακτικά προβλήματα. Ο σκοπός αυτής της παρουσίασης είναι να έρθει ο αναγνώστης σε επαφή με το ευρύ φάσμα εφαρμογών οι οποίες χρησιμοποιούν ΤΝΔ. Πρόκειται για εφαρμογές που προέρχονται από διαφορετικά τεχνικά ή επιστημονικά πεδία. Εκτιμώντας κάποιος τις προσωπικές του ανάγκες του, θα βρει πολλές χρήσιμες πληροφορίες αλλά και πραγματικές συμβουλές κατάλληλες να τις ενσωματώσει στην δική του δουλειά.

2.17.1 ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Ο αυτόματος έλεγχος συστημάτων περιλαμβάνει απλά προβλήματα ελέγχου όπως η ισορρόπηση μιας ράβδου που βρίσκεται πάνω σε ένα κινούμενο όχημα, μέχρι πολύπλοκα προβλήματα ελέγχου όπως η κίνηση ενός αυτόνομου οχήματος ή ο έλεγχος στην παραγωγή ενός εργοστασίου.

Τα ΤΝΔ μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα επίπεδα ενός "έξυπνου" ιεραρχημένου συστήματος ελέγχου δίνοντας υψηλό βαθμό αυτονομίας στο ελεγχόμενο σύστημα. Έτσι είναι χρήσιμα στο κατώτερο επίπεδο εκτέλεσης, όπου οι συμβατικοί αλγόριθμοι ελέγχου υλοποιούνται με hardware ή software, λόγω της

ικανότητας τους να προσεγγίζουν συναρτήσεις. Ακόμη είναι χρήσιμα στο επίπεδο συντονισμού και στο οργανωτικό επίπεδο όπου οι αποφάσεις βασίζονται σε αβέβαιες ή ημιτελείς πληροφορίες, λόγω της ικανότητας ταξινόμησης προτύπων και αποθήκευσης πληροφοριών.

Κάποιο TND μπορεί να εκπαιδευτεί ως ελεγκτής ανοιχτού ή κλειστού βρόγχου. Συνήθως η επιθυμητή έξοδος του TND, δηλαδή, το σήμα ελέγχου του συστήματος, είναι άγνωστο και πρέπει να υπολογιστεί από την γνωστή επιθυμητή έξοδο του συστήματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται κάποιο μαθηματικό μοντέλο του συστήματος ή κάποιο μοντέλο TND του συστήματος ή κάποιο μοντέλο TND του αντίστροφου συστήματος, υποθέτοντας ότι υπάρχει ένα κατάλληλο TND.

Δυστυχώς, λόγω της μεγάλης μαθηματικής πολυπλοκότητας, είναι πολύ δύσκολο να αποδειχτεί η σταθερότητα κάποιου μη γραμμικού συστήματος που ελέγχεται από μη γραμμικό TND Ελεγκτή. Ωστόσο, παρουσιάζονται συνεχώς θεωρητικές μελέτες που συνεισφέρουν στην καλύτερη κατανόηση αυτών των συστημάτων.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα συστημάτων ελέγχου με TND. Ένα τέτοιο είναι αυτό που εφαρμόζεται στον έλεγχο ενός συστήματος υπό συνθήκες δομικών αστοχιών. Στο ανώτερο επίπεδο, το ιεραρχημένο TND αναγνωρίζει και ταξινομεί κάποια βλάβη σε μια από τις κατηγορίες βλαβών και στην συνέχεια ενεργοποιεί ένα προκαθορισμένο υποσύστημα ελέγχου για να εξισορροπήσει την βλάβη. Στο κατώτερο επίπεδο, ο TND ελεγκτής, λαμβάνοντας υπ' όψη τις νέες τιμές των παραμέτρων του συστήματος, αναθεωρεί τις παραμέτρους του TND ελεγκτή και βελτιώνει την συνολική απόδοση του συστήματος. Αυτή η λειτουργία πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο.

Άλλο σύστημα TND που υλοποιήθηκε από την Pavilion Technologies Inc. σε λογισμικό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τον περιορισμό των αερίων αποβλήτων κάποιου εργοστασίου σύμφωνα με τις αυστηρότερες προδιαγραφές εκπομπών (Clean Air Act). Το TND προβλέπει τις εκπομπές του εργοστασίου χρησιμοποιώντας δεδομένα από τους εγκατεστημένους αισθητήρες. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος του συστήματος είναι λιγότερο από το μισό κόστος ενός συστήματος που θα παρακολουθούσε συνεχώς τις τιμές των εκπομπών.

Στην Ιαπωνία οι εταιρίες Fujitsu και Nippon Steel ανέπτυξαν να σύστημα ελέγχου για την συνεχή χύτευση του χάλυβα. Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο παραγωγής το λιωμένο μέταλλο χύνεται μέσα στο καλούπι και λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας καλουπιού και μετάλλου το εξωτερικό τμήμα του μετάλλου στερεοποιείται γρηγορότερα από το εσωτερικό που παραμένει λιωμένο για περισσότερο χρονικό διάστημα. Από την άλλη άκρη το καλουπιού βγαίνει το στερεοποιημένο μέταλλο.

Η διαρραγή του υλικού μπορεί να συμβεί όταν το στερεοποιημένο υλικό κολλήσει στο τοίχωμα του καλουπιού. Το μέταλλο που κόλλησε κινείται προς την έξοδο του καλουπιού με μικρότερη ταχύτητα από το υπόλοιπο υλικό και όταν φτάσει στην έξοδο του καλουπιού από την τρύπα που δημιουργείται λόγω της ασυνέχειας του μανδύα πετάγεται λιωμένο μέταλλο οπότε πρέπει να σταματήσει η παραγωγή με επακόλουθο οικονομική ζημία και απώλεια χρόνου.

Η πρόληψη της διαρραγής είναι εξαιρετικής σημασίας και μπορεί αποφευχθεί με κατάλληλο έλεγχο της θερμοκρασίας αν παρατηρήσουμε ότι η διαρραγή του μανδύα γίνεται αντιληπτή από την υψηλότερη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του καλουπιού και στην περιοχή της διαρραγής, λόγω της επαφής του καλουπιού με το λιωμένο μέταλλο. Αυτό ισοδυναμεί με την ανίχνευση μιας κινούμενης θερμικής κηλίδας. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι κηλίδες δεν

ισοδυναμούν με διαρραγή. Η πραγματική διαρραγή έχει συγκεκριμένο θερμοκρασιακό προφίλ, και κινείται με συγκεκριμένο τρόπο. Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα πρόβλημα αναγνώρισης προτύπου σχήματος και της κίνησης του.

Το σύστημα που ανέπτυξαν οι δύο Ιαπωνικές εταιρίες αναγνωρίζει την διαρραγή με σχεδόν απόλυτη επιτυχία. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από δύο συστοιχίες ΤΝΔ BP που η μια αναγνωρίζει το σχήμα και η άλλη την κίνηση της διαρραγής. Τα διανύσματα εισόδου των ΤΝΔ προέρχονται από μετρήσεις θερμοκρασίας που λαμβάνονται από δύο σειρές αισθητήρων θερμοκρασίας (θερμοζεύγη). Η μια σειρά είναι τοποθετημένη στην αρχή του καλουπιού και η άλλη στο τέλος του. Η δειγματοληψία επαναλαμβάνεται σε χρονικό διάστημα μερικών δευτερολέπτων.

Στο πρώτο στάδιο επεξεργασίας το σύστημα ψάχνει για κάποια χαρακτηριστική πτώση και αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρώντας τις μεταβολές θερμοκρασίας σε όλα τα διαθέσιμα θερμοζεύγη. Κάθε ΤΝΔ έχει ως διάνυσμα εισόδου 10 διαδοχικές τιμές (διαφορές θερμοκρασίας) από ένα θερμοζεύγος. Η έξοδος του ΤΝΔ είναι ένα σήμα που εκπέμπεται εάν εμφανιστεί το θερμοκρασιακό προφίλ της διαρραγής στο συγκεκριμένο θερμοζεύγος.

Στο δεύτερο στάδιο επεξεργασίας το σύστημα συγκεντρώνει 6 διαδοχικά σήματα από διπλανά ΤΝΔ (θερμοζεύγη) της επάνω σειράς. Το διάνυσμα εισόδου κάθε ΤΝΔ αποτελείται από τις μεγαλύτερες τιμές της κάθε εξάδας (δισδιάστατο διάνυσμα εισόδου). Η έξοδος του ΤΝΔ προσδιορίζει εάν διπλανά θερμοζεύγη αναγνώρισαν το θερμοκρασιακό προφίλ της διαρραγής. Επομένως ο αριθμός των ΤΝΔ του δεύτερου σταδίου επεξεργασίας εξαρτάται από τον αριθμό ζευγαριών θερμοζευγών. Τέλος το ΤΝΔ με την μεγαλύτερη τιμή εξόδου αντιπροσωπεύει τα θερμοζεύγη του επάνω τμήματος του καλουπιού.

Στο τρίτο στάδιο επεξεργασίας η προηγούμενη τιμή μαζί με τις αντίστοιχες του πρώτου σταδίου επεξεργασίας της κάτω σειράς αισθητήρων χρησιμοποιούνται για να γίνει η πρόβλεψη της ασυνέχειας του μετάλλου. Αν αυτές οι τιμές υπερβούν κάποια οριακή τιμή, τότε το σύστημα ελαττώνει την ταχύτητα αφέλκυσης του χάλυβα για να αποφευχθεί η διαρραγή. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το στάδιο δεν χρησιμοποιούνται ΤΝΔ.

Η εκπαίδευση όλων των ΤΝΔ έγινε με 34 διαφορετικά διανύσματα (θερμοκρασιακά προφίλ), 9 από τα οποία αντιστοιχούσαν σε διαρραγές ενώ ο έλεγχος απόδοσης έγινε με 27 διαφορετικά διανύσματα. Η αναγνώριση ήταν εξαιρετικά ικανοποιητική, εφόσον το σύστημα αναγνώρισε με σχεδόν απόλυτη επιτυχία τις διαρραγές και μάλιστα 6.5 δευτερόλεπτα ταχύτερα κατά μέσο όρο. Το σύστημα εγκαταστάθηκε στο εργοστάσιο παραγωγής χάλυβα της Nippon Steel το 1990 και μετά από μικρές διορθώσεις, η συνολική του απόδοση πλησιάζει το 100%. Κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του αναγνώρισε όλες τις διαρραγές και σήμανε μικρότερο αριθμό λανθασμένων συναγερμών από το προηγούμενο σύστημα.

2.17.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ.

Παράδειγμα ενός ΤΝΔ που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο χημικών διεργασιών είναι το σύστημα που τοποθετήθηκε για τον έλεγχο του πύργου απόσταξης της TEXACO στην Washington. Το πακέτο λογισμικού ΤΝΔ που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής ήταν το DANA (Design Advisor, Neural Analyser) της NeuralWare Inc.

Ακόμη εξετάστηκε η δυνατότητα εφαρμογής των ΤΝΔ σε μη γραμμικές χημικές διεργασίες όπως είναι η σταθερή κατάσταση μιας χημικής αντίδρασης και η ρύθμιση

του pH μιας αντίδρασης με συνεχή ανάδευση.

Στην πρώτη περίπτωση το TND εκπαιδεύεται με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης BP. Ως εισόδοι του TND λαμβάνονται οι συγκεντρώσεις των αντιδραστηρίων πριν την αντίδραση, καθώς και ο χρόνος αντίδρασης, ενώ ως έξοδοι λαμβάνονται Οι συγκεντρώσεις των προϊόντων της αντίδρασης. Ο αριθμός των TN του κρυφού επιπέδου ορίστηκε, αυθαίρετα, σε 9 TN. Η σύγκλιση του TND επήρθε μετά από 10000 εκπαιδευτικές επαναλήψεις και η απόδοση του TND στο σύνολο ελέγχου ήταν πολύ καλή.

Για την ρύθμιση του pH ως διάνυσμα εισόδου του TND λαμβάνεται ένα κινούμενο χρονικά παράθυρο 5 τιμών του pH και 10 τιμών του ρυθμού εισόδου των αντιδραστηρίων (15 TN στο επίπεδο εισόδου). Ως διάνυσμα εξόδου λαμβάνονται οι 5 επόμενες τιμές του pH. Ο αριθμός των TN του κρυφού επιπέδου ορίστηκε αυθαίρετα, σε 5 TN. Το pH σταθερής κατάστασης ήταν 9. Για τον έλεγχο του TND χρησιμοποιήθηκε ελαφρά μικρότερη τιμή του ρυθμού εισόδου των αντιδραστηρίων έτσι ώστε το pH σταθερής κατάστασης να έχει τιμή 7. Η απόδοση του TND ήταν πολύ κοντά στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και σημαντικά καλύτερη από ένα αυτοπαλίνδρομο μοντέλο με κινούμενο μέσο όρο (Auto regressive moving average, ARMA) με το οποίο συγκρίθηκε.

2.17.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΜΠΟΤ.

Οι περισσότερες μελέτες που αναφέρονται στον έλεγχο των ρομπότ, επικεντρώνονται στην επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος που ορίζεται ως εξής:

Δεδομένης της τελικής θέσεως του ρομπότ (βραχίονα) ποιες είναι οι απαραίτητες κινήσεις των συνδεσμών για να φτάσει ο βραχίονας στον στόχο.

Αυτό το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα δύσκολο λόγω του μεγάλου αριθμού των ελευθέρων παραμέτρων, των πιθανών διαδρομών, των μεταβλητών φορτίων και της ασάφειας του περιβάλλοντος. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούμε για την εκπαίδευση του TND μπορεί να προέρχονται από οπτικούς αισθητήρες τοποθετημένους επάνω στο ρομπότ ή κοντά σε αυτό οι οποίοι σχηματίζουν το οπτικό του πεδίο. Το TND προσπαθεί να συσχετίσει την εικόνα κάποιου αντικείμενου με την κίνηση του βραχίονα προς την θέση που βρίσκεται' το αντικείμενο. Άλλη μέθοδος είναι η τροφοδότηση του TND με τις τρισδιάστατες συντεταγμένες της τελικής θέσης του ρομπότ, ενώ ως έξοδος του TND λαμβάνονται οι εντολές ενεργοποίησης των κινητήρων του βραχίονα.

Ένα τέτοιο απλοποιημένο πρόβλημα είναι ο έλεγχος ενός ρομποτικού βραχίονα που αποτελείται από δύο ισομήκη τμήματα κινούμενα σε δισδιάστατο χώρο,²⁴¹ Στην άκρη του βραχίονα είναι προσαρμοσμένη η αρπάγη με την οποία συλλαμβάνονται τα αντικείμενα. Ο έλεγχος του ρομπότ πραγματοποιείται ολικά με διάφορα TND που εκπαιδεύονται με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης BP και είναι ιεραρχικά δομημένα. Τα TND υψηλού επιπέδου αναλαμβάνουν την λεπτομερή περιγραφή του χώρου εργασίας, την μετατροπή των συντεταγμένων και την διαδικασία λήψης των αποφάσεων κίνησης, ενώ τα TND χαμηλού επιπέδου αναλαμβάνουν την εκτέλεση της σωστής σειράς δράσεων ελέγχου.

Τα ενσωματωμένα TND προσφέρουν ευελιξία προσαρμογής στις μη προβλεπθείσες αλλαγές του χώρου εργασίας, στις μεταβολές του περιβάλλοντος, στον

μετασχηματισμό των συντεταγμένων, στο φορτίο, και στην κατεύθυνση κίνησης. Η αρπάγη μπορεί να τοποθετηθεί στη σωστή θέση εφόσον το σύστημα χρησιμοποιεί τόσο αριθμητικές πληροφορίες όσο και συναφείς πληροφορίες που προσφέρονται σε πραγματικό χρόνο. Επομένως η απαραίτητη γνώση για την προσαρμογή σε νέες συνθήκες αποκτάται μέσω της εμπειρίας καθώς αναπτύσσονται στρατηγικές αυτο-οργάνωσης ενός εξελισσόμενου συστήματος.

Επειδή σε κάθε θέση της αρπάγης αντιστοιχούν δύο πιθανές γωνίες του "αγκώνα" του βραχίονα, αναπτύχθηκαν δύο ΤΝΔ, ένα για κάθε πιθανή γωνία. Ως είσοδοι του κάθε ΤΝΔ λαμβάνονται οι συντεταγμένες (x,y) της τρέχουσας θέσεως της αρπάγης και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ως έξοδοι του κάθε ΤΝ λαμβάνονται οι δύο γωνίες των βραχιόνων. Τέλος ένα ακόμη ΤΝ αποφασίζει πιο από τα δύο προηγούμενα είναι το καταλληλότερο. Ως είσοδοι του τελευταίου λαμβάνονται οι έξοδοι των δύο προηγούμενων ΤΝΔ καθώς επίσης και οι συντεταγμένες (x,y) της αρχικής θέσεως του βραχίονα.

Στη συνέχεια για τον προσδιορισμό της δυναμικής συμπεριφοράς του βραχίονα λαμβάνονται ως είσοδοι ενός ΤΝΔ οι συντεταγμένες (x,y) της αρχικής θέσεως της αρπάγης, η μεταβολή των δύο γωνιών των βραχιόνων (υπολογίζονται από τον ΤΝΔ ελεγκτή) και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος η οποία επηρεάζει το μήκος των βραχιόνων. Ως έξοδοι του ΤΝΔ λαμβάνονται οι συντεταγμένες (x,y) της τελικής θέσεως της αρπάγης. Το ΤΝΔ εκπαιδεύεται με τον ΒΡ και για τον προσδιορισμό του μεγέθους του εφαρμόζετε σταδιακή αύξηση των ΤΝ του κρυφού επιπέδου.

Ακόμη για την καλύτερη δυνατή εκπαίδευση του χρησιμοποιείται μεταβλητό σύνολο εκπαιδευτικών διανυσμάτων. Αυτό το σύνολο διανυσμάτων στην αρχή της εκπαίδευσης είναι μικρό και τυχαία επιλεγμένο. Στην συνέχεια, εφόσον το ΤΝΔ μάθει αυτό το σύνολο διπλασιάζουμε τον αριθμό των εκπαιδευτικών διανυσμάτων προσθέτοντας νέα εκπαιδευτικά διανύσματα και η εκπαίδευση συνεχίζεται μέχρι το ΤΝΔ να μάθει και το νέο εκπαιδευτικό σύνολο κοκ.

Τέλος ο σκοπός του ΤΝΔ ελεγκτή είναι η παροχή μιας σειράς από εντολές για την μετακίνηση του βραχίονα από την αρχική προς την τελική θέση της αρπάγης, ανάλογα με το πλάνο μετακίνησης. Στην προκειμένη περίπτωση το πλάνο προσδιορίζεται από έναν υψηλού επιπέδου "σχεδιαστή" (ΤΝΔ ΒΡ και αφορά τον τύπο της τροχιάς που θα ακολουθηθεί, επιλέγοντας μεταξύ γραμμικής $(Bx+C)$ ή κυκλικής τροχιάς $(Ax'+Bx+C)$. Ακόμη "σχεδιαστής" διοικεί και οργανώνει τις πληροφορίες των αισθητήρων του βραχίονα και είναι υπεύθυνος για την ανανέωση της ενσωματωμένης γνώσεως. Ως είσοδοι του ΤΝΔ ελεγκτή λαμβάνονται οι συντεταγμένες (x,y) της τρέχουσας θέσεως της αρπάγης, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και το πλάνο που προσδιορίστηκε από τον σχεδιαστή μέσω των A , B και c . Ως έξοδοι του ΤΝΔ λαμβάνονται οι μεταβολές των δύο γωνιών των βραχιόνων.

Αυτή η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε βραχίονες με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και τρισδιάστατη κίνηση, εφόσον προσαρμοστεί κατάλληλα το πλάνο μετακίνησης.

Μια άλλη πιο πολύπλοκη εφαρμογή είναι ο έλεγχος ενός ρομποτικού αυτοκινούμενου βραχίονα με επτά βαθμούς ελευθερίας κινήσεων σε τρισδιάστατο χώρο και δύο αρπάγες μία σε κάθε άκρο του. Σκοπός αυτού του βραχίονα είναι η παροχή βοηθητικών χειρισμών σε αστροναύτες που εργάζονται στον Διαστημικό Σταθμό. Ο έλεγχος ενός τέτοιου ρομπότ είναι εξαιρετικά δύσκολος, γεγονός που οφείλεται στην υπερ-ελαφριά κατασκευή του (για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας και αντιμετώπισης φαινομένων μικροβαρύτητας) και έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ελαστικών φαινομένων μεταξύ των κινητών συνδέσμων.

Έτσι εφαρμόστηκε στο εργαστήριο, μετά από κατάλληλη ισοστάθμιση με αντίβαρα των διαστημικών συνθηκών, ένα σύστημα ελέγχου βασιζόμενο σε ΤΝΔ. Για τον έλεγχο κάθε συνδέσμου χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστό ΤΝΔ και όπως γίνεται φανερό το διάνυσμα εισόδου του κάθε ΤΝΔ εξαρτάται από τα άλλα ΤΝΔ. Ως εισοδοί σε κάθε ΤΝΔ λαμβάνονται η ταχύτητα, η επιτάχυνση και τρεις ακόμη όροι που εκφράζουν την συσχέτιση των συνδέσμων. Ακόμη υπάρχουν δύο κρυφά επίπεδα με 20 και 13 ΤΝ αντίστοιχα. Το επίπεδο εξόδου διαθέτει έναν ΤΝ που αντιπροσωπεύει την ροπή που εφαρμόζεται στον σύνδεσμο.

Η εκπαίδευση των ΤΝΔ πραγματοποιήθηκε με τον ΒΡ και η ιδιαιτερότητα της διαδικασίας εκπαίδευσης έγκειται στο ότι οι επιθυμητές έξοδοι είναι άγνωστοι, ενώ είναι γνωστή κάποια εκτίμηση του σφάλματος εξόδου. Επομένως ο αλγόριθμος εκπαίδευσης προσπαθεί να υπολογίσει τις μεταβαλλόμενες χρονικά επιθυμητές εξόδους χρησιμοποιώντας την εκτίμηση του σφάλματος εξόδου. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η εκπαίδευση των ΤΝΔ γίνεται σε πραγματικό χρόνο κατά την διάρκεια της κίνησης του ρομπότ. Το σύνολο των εκπαιδευτικών διανυσμάτων είναι δυναμικά μεταβαλλόμενο και αποτελείται από τροχιές επιλεγόμενες και αντικαθιστώμενες από άλλες τροχιές με στοχαστική διαδικασία. Επιπλέον γίνεται έλεγχος για το αν η επιλεγείσα τελική θέση είναι δυνατόν να προσεγγιστεί από τον βραχίονα, λόγω φυσικών περιορισμών και τοποθέτησης του βραχίονα. Ακόμη βρέθηκε ότι η τροποποίηση του αλγορίθμου εκπαίδευσης σε ανατροφοδοτούμενο (recurrent), έτσι ώστε τα ΤΝΔ να αποκτήσουν ικανότητα διατήρησης της παρελθούσας γνώσεως, βελτιώνει σημαντικά την απόδοση.

Με αυτή την μέθοδο ο έλεγχος της κίνησης του βραχίονα είναι ιδιαίτερα ακριβής σε σχέση με εφαρμοσθείσες γραμμικές μεθόδους, εφόσον το σφάλμα των τροχιών μειώνεται κατά 85%. Μια άλλη εφαρμογή στην ρομποτική που εξετάστηκε στο Space Systems Laboratory του Πανεπιστημίου MIT αφορά τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο (on-line) ενός υποβρυχίου ρομπότ από έναν ελεγκτή με τεχνολογία ΤΝΔ (ΒΡ) και κατάλληλη προσαρμογή στα πλαίσια της θεωρίας ελέγχου. Πρόκειται για ένα ερευνητικό ρομπότ που έχει ως σκοπό την διερεύνηση των δυνατοτήτων χειροκίνητης ή τηλεχειριζόμενης πρόσδεσης του σε περιβάλλον μηδενικής πλευστότητας. Οι προσομοιώσεις σε Η/Υ αλλά και οι πρακτικές μετρήσεις απέδειξαν ότι ο ΤΝΔ ελεγκτής διαθέτει αρκετά πλεονεκτήματα, αλλά χρειάζεται μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (100.000 εκπαιδευτικοί κύκλοι) για να συγκλίνει. Επομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός off-line αρχικής εκπαίδευσης του ΤΝΔ με μια on-line διαδικασία βελτιστοποίησης του. Τέλος, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο παράλληλης μορφής υπολογιστικό σύστημα γίνεται πλήρης εκμετάλλευση του ελεγκτή.

Μια άλλη εργαστηριακή εφαρμογή αφορά την εκπαίδευση αυτοκινούμενων ρομπότ σε διαδικασίες όπως είναι η απόδραση-σύλληψη (κλέφτες - αστυνομικοί). Κάθε ρομπότ κινείται αυτόνομα από δικούς του κινητήρες και επικοινωνεί με το περιβάλλον μέσω 12 αισθητήρων (υπέρυθρων, υπερήχων, αφής στρέψης). Τα σήματα των αισθητήρων εισάγονται στο ΤΝΔ, του οποίου οι έξοδοι αποτελούν τα σήματα ενεργοποίησης των, κινητήρων. Ανάλογα με την εκπαίδευση του, ένα ρομπότ μπορεί να μάθει να "ακολουθεί" τα άλλα (αστυνομικός) ή να τα αποφεύγει (κλέφτης). Πιο συγκεκριμένα ένα ρομπότ της πρώτης κατηγορίας εκπαιδεύεται έτσι ώστε όταν εντοπίσει κάποιον υπέρηχο ή υπέρυθρη ακτινοβολία προερχόμενη από άλλο ρομπότ (τα ρομπότ είναι εφοδιασμένα με LEDs), να κινείται προς τη κατεύθυνση το εκπεμπόμενου σήματος. Αντίστοιχα τα ρομπότ της δεύτερης κατηγορίας κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση του εκπεμπόμενου σήματος.

Το ΤΝΔ που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο αποτελείται από ένα ΤΝΔ που δίνει στα ρομπότ ικανότητα "κοινής λογικής" και ένα επιπλέον ΤΝΔ που ενέχει την θέση "ενστίκτων".

Οι εισοδοί στα ΤΝΔ (σήματα από τους αισθητήρες) λαμβάνουν τις τιμές 0 και 1, όπως και οι έξοδοι των ΤΝΔ (ενεργοποίηση - απενεργοποίηση των κινητήρων). Πιο συγκεκριμένα τα σήματα από τα αισθητήρια εισάγονται στο ΤΝΔ "κοινής λογικής" που υπολογίζει το πρότυπο συμπεριφοράς του ρομπότ πχ. όταν εντοπιστεί υπέρυθρη ακτινοβολία από τον πρόσθιο αισθητήρα, τότε το ρομπότ κινείται προς τα εμπρός. Το ΤΝΔ "ενστίκτων" υπολογίζει την σχέση μεταξύ των αισθητικών δεδομένων και ορισμένων προτύπων συμπεριφοράς που πρέπει να υιοθετήσει το ρομπότ για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πχ. για την αποφυγή κάποιου εμποδίου. Η υλοποίηση σε δύο μικρότερα ΤΝΔ διευκολύνει την εκπαίδευση, περιορίζει το απαιτούμενο συνολικό μέγεθος του ΤΝΔ και κατά συνέπεια τον αριθμό των εκπαιδευτικών διανυσμάτων. Σε αντίθετη περίπτωση η λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολη.

Μια άλλη πιο πολύπλοκη εφαρμογή είναι η πλοήγηση ενός αυτοκινούμενου ρομπότ σε εσωτερικό χώρο (διακλαδιζόμενος διάδρομος) με οροθέσια (πόρτες και εσοχές), βασισμένη σε οπτικές πληροφορίες του περιβάλλοντος. Οι πληροφορίες που χρησιμοποιεί το σύστημα δεν έχουν γεωμετρική υφή αλλά

συνθέτουν μια αναπαράσταση του διαδρόμου ανάλογα με την σειρά εμφάνιση των οροθέσιων και την γεινίαση τους. Έτσι το ρομπότ είναι σε θέση να εκτελέσει μια σειρά από εντολές όπως "ακολούθησε τον διάδρομο και στρίψε στην δεύτερη πόρτα δεξιά". Αυτή η ικανότητα οφείλεται σε μια ομάδα από ΤΝΔ που ενεργοποιείται από ένα σύστημα λήψεως αποφάσεων. Η ομάδα είναι εκπαιδευμένη στην αναγνώριση και μετάφραση των οπτικών πληροφοριών και την εκτέλεση βασικών διαδικασιών πλοήγησης όπως είναι η κίνηση στον διάδρομο χωρίς να συγκρούεται το ρομπότ στα τοιχώματα του διαδρόμου και η αναγνώριση των οροθέσιων.

Αυτή η προσέγγιση ομοιάζει με τον τρόπο που οδηγεί κάποιος άνθρωπος ένα αυτοκίνητο, δηλαδή, η καθοδήγηση του ρομπότ είναι μια αλληλεπιδραστική διαδικασία που υλοποιείται με χρήση πολύ απλών γεωμετρικών μοντέλων και ομοιάζει με τους "χάρτες πλοήγησης" του ανθρώπινου νου. Για την αποφυγή των εμποδίων χρησιμοποιείται μια μονάδα υπερήχων που ανάλογα με τον χρόνο και την γωνία επιστροφής του εκπεμπόμενου σήματος υπολογίζει την θέση του εμποδίου.

Στην συνέχεια περιγράφονται οι φάσεις επεξεργασίας κατά την καθοδήγηση του ρομπότ.

Μοντελοποίηση του διαδρόμου. Ο διάδρομος περιγράφεται από κόμβους όπως είναι οι πόρτες, οι εσοχές, οι διακλαδώσεις και τα αδιέξοδα. Στην περιγραφή κάθε κόμβου περιλαμβάνονται χαρακτηριστικά όπως το όνομα, η κατεύθυνση, το αριστερό και το "δεξιό οροθέσιο, ο προηγούμενος και ο επόμενος κόμβος.

Σχεδίαση της διαδρομής. Εμπεριέχει πολλά στοιχεία δανεισμένα από την ανθρώπινη συμπεριφορά επειδή οι διαδρομές σχεδιάζονται περιγραφικά χωρίς πολλά γεωμετρικά στοιχεία. Η διαδρομή σχεδιάζεται με βάση την αρχική και τελική θέση του ρομπότ (δίνεται από τον χειριστή) και τα οροθέσια. Έτσι Το ρομπότ διαθέτει την ευχέρεια να προσδιορίζει την θέση του ανάλογα με το περιβάλλον και να γνωρίζει πως θα φτάσει στην τελική θέση του. Εποπτεία από χειριστή. Κατά την αυτόνομη λειτουργία του, ρομπότ, ο χειριστής καθορίζει την αρχική και την τελική θέση του ρομπότ. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση της διαδρομής. Κατά την εξαρτημένη λειτουργία ο χειριστής δίνει απ'ευθείας εντολές στο ρομπότ που προέρχονται από ένα προκαθορισμένο ρεπερτόριο πχ. προχώρησε

εμπρός, στρίψε αριστερά, σταμάτα κλπ.

Κίνηση μέσα στα όρια του διαδρόμου και αναγνώριση οροθέσεων. Η κίνηση μέσα στα όρια του διαδρόμου ρυθμίζεται απ(τρία υποσυστήματα ΤΝΔ με βάση τις οπτικές πληροφορίες απ! την κάμερα που βρίσκεται στερεωμένη στο ρομπότ.

Η αρχική εικόνα της κάμερας έχει ανάλυση 512x480 και για να περιοριστεί ο αριθμός των υπολογισμών υποδειγματολειπτείτε σε 64x60 pixels. Στην συνέχεια πραγματοποιούμε αναγνώριση αιχμών (edge detection) και κατασκευάζουμε έναν χάρτη Hough. Το περιεχόμενο αυτού του χάρτη τροφοδοτείται στο πρώτο υποσύστημα ΤΝΔ που αποτελείται από δύο παρόμοια ΤΝΔ ένα για την παρακολούθηση του κάθε τοίχου (117 ΤΝ στο επίπεδο εισόδου του καθενός, δύο κρυφά επίπεδα με 12 και 6 ΤΝ και 6 ΤΝ ση επίπεδο εξόδου). Οι έξοδοι των ΤΝΔ αποτελούν τις εντολές στροφής αριστερά ή δεξιά με βήμα 10 και συνδυάζονται ανταγωνιστικά. Ο σκοπός αυτού του υποσυστήματος είναι να κρατάει το ρομπότ επάνω σε μια σταθερή λωρίδα κίνησης και ν(το επαναφέρει σε αυτήν αν παρεκκλίνει από την πορεία του πχ για να αποφύγει κάποιο εμπόδιο.

Τα άλλα δύο υποσυστήματα αναλαμβάνουν την στροφή αριστερά ή δεξιά όταν το ρομπότ βρεθεί σε διακλάδωση του διαδρόμου. Αποτελούνται όπως και το προηγούμενο από δύο ΤΝΔ το καθένα, ένα για την ανίχνευση του δεξιού και ένα για την ανίχνευση του αριστερού τοίχου (117 ΤΝ στο επίπεδο εισόδου του καθενός, δύο κρυφά επίπεδα με 12 και 4 ΤΝ και 2 ΤΝ στο επίπεδο εξόδου). Οι έξοδοι των ΤΝΔ αποτελούν τις εντολές στροφής αριστερά ή δεξιά κατά 30° ή 60° και συνδυάζονται ανταγωνιστικά όπως στο προηγούμενο υποσύστημα.

Τέλος ένα ακόμη ΤΝΔ αναγνωρίζει τις διακλαδώσεις του διαδρόμου και τα αδιέξοδα και επιπλέον πραγματοποιεί μια ποσοτική εκτίμηση της απόστασης τους από το ρομπότ (21 ΤΝ στο επίπεδο εισόδου που καλύπτουν μια καθορισμένη περιοχή του χάρτη Hough, δύο κρυφά επίπεδα με 6 και 4 ΤΝ και 3 ΤΝ στο επίπεδο εξόδου). Οι έξοδοι του ΤΝΔ προσδιορίζουν την απόσταση από το ρομπότ (κοντά, μακριά, στο).

Σύστημα λήψεως αποφάσεων. Ελέγχει την ενεργοποίηση απενεργοποίηση των ΤΝΔ. Όταν το σύστημα υπερήχων εντοπίσει κάποιο εμπόδιο, τότε, το σύστημα λήψεως αποφάσεων αναστέλλει προσωρινά την πλοήγηση του ρομπότ μέσω του οπτικού συστήματος. Μετά από τους κατάλληλους χειρισμούς και την αποφυγή του εμποδίου ο έλεγχος επανέρχεται στο οπτικό σύστημα.

Μετά την εκπαίδευση με τον BP και κατά την φάση ελέγχου, τα ΤΝΔ ήταν σε θέση να παράγουν τις σωστές γωνίες στροφής στο 86% των περιπτώσεων, λανθασμένες γωνίες σε ποσοστό 10% (το σφάλμα περιοριζονταν σε απόκλιση 10°, ενώ στο υπόλοιπο 4% δεν ήταν δυνατόν να ληφθεί απόφαση διότι δεν πραγματοποιούνταν αναγνώριση των τοίχων. Σε αυτή την περίπτωση, το ρομπότ έστριβε λίγο έτσι ώστε να συλλάβει μια καινούρια εικόνα από ελαφρώς διαφορετική γωνία. Η προσέγγιση του οπτικά καθοδηγημένου ρομπότ (με χάρτες γνώσεως, αναπαράσταση του περιβάλλοντος, έλλειψη γεωμετρικής ακρίβειας και δομή των εντολών) ομοιάζει αρκετά με τον τρόπο πλοήγησης που υιοθετείται από κάποιον άνθρωπο.

2.18 Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Το κόστος κατασκευής ΟΚ έχει αυξηθεί κατά 1000 φορές τα τελευταία 20 χρόνια. Η κατασκευή ενός σύγχρονου εργοστασίου παραγωγής ΟΚ κοστίζει πολλές εκατοντάδες εκατομμύρια δολάρια, γεγονός που επιτρέπει σε λίγους μόνο

κατασκευαστές να παράγουν ΟΚ. Για να συγκρατηθεί το κόστος στο χαμηλότερο δυνατόν επίπεδο, οι κατασκευαστές είναι υποχρεωμένοι να χρησιμοποιούν τεχνολογίες αιχμής στην ολοκληρωμένη κατασκευή με βοήθεια Η/Υ των ΟΚ (Integrated circuits Computer Integrated manufacturing, IC-CIM). Η διαδικασία κατασκευής κάποιου ΟΚ περιλαμβάνει, συνήθως, εκατοντάδες ή και χιλιάδες διαδοχικά βήματα. Αυτό σημαίνει ότι για να εξασφαλιστεί η ποιότητα των ΟΚ απαιτείται διαρκής παρακολούθηση εκατοντάδων παραγόντων. Ορισμένες από τις διεργασίες παραγωγής ΟΚ όπου δοκιμάστηκαν τα ΤΝΔ περιγράφονται στην συνέχεια.

- **Μοντελοποίηση διεργασιών.** Μια δημοφιλής διεργασία στην οποία εφαρμόστηκαν ΤΝΔ είναι η χάραξη της επιφάνειας του ΟΚ χρησιμοποιώντας πλάσμα ιόντων (πχ. CCl_4) κάποιου αερίου το οποίο αντιδράει με το υπόστρωμα, σε προκαθορισμένες περιοχές της επιφάνειας, και αφαιρεί το υλικό. Οι μεταβλητές εισόδου είναι η πίεση του αερίου, η ισχύς της εναλλασσόμενης πηγής που ιονίζει το αέριο, η απόσταση των ηλεκτροδίων και η σύσταση του αερίου. Οι μεταβλητές εξόδου είναι ο ρυθμός χάραξης και η ομοιομορφία της χάραξης. Το μοντέλο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ΟΚ κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Δυστυχώς η συμπεριφορά των αντιδρώντων ιόντων, υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και οι αριθμητικές μέθοδοι που εφαρμόζονταν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο. Η σύγκριση που έκαναν ερευνητές του Georgia Tech μεταξύ ενός BP ΤΝΔ μοντέλου αυτής της διεργασίας και ενός μοντέλου στατιστικής παλινδρόμησης, έδειξε μεγαλύτερη ακρίβεια κατά 40%-70% του ΤΝΔ. Σε παρόμοια αποτελέσματα, όσον αφορά την ικανότητα γενίκευσης, κατέληξαν οι ερευνητές της DuPont Electronics. Οι ερευνητές των εργαστηρίων Bell χρησιμοποίησαν τα ΤΝΔ για να αναλύσουν την ευαισθησία της χάραξης στην μεταβολή των παραμέτρων. Έτσι, βρήκαν ότι η σημαντικότερη παράμετρος ήταν η ροή του αερίου και η λιγότερη σημαντική η πίεση του.

- **Βελτιστοποίηση διεργασιών.** Η βελτιστοποίηση αποτελεί την φυσική συνέχεια της μοντελοποίησης. Στο Berkeley ερευνητές χρησιμοποίησαν την ικανότητα γενίκευσης των ΤΝΔ για να παράγουν νέους τρόπους χάραξης με χαμηλής πίεσης χημική εξάτμηση του υποστρώματος. Στο Georgia Tech χρησιμοποίησαν γενετικούς αλγορίθμους για την αναζήτηση, στον χώρο εξόδων του ΤΝΔ μοντέλου, ενός συνόλου συνθηκών που βελτιστοποιούν ταυτόχρονα αρκετές παραμέτρους. Συνήθως οι απαιτήσεις των παραμέτρων είναι αλληλοσυγκρουόμενες. Έτσι κάποιο βελτιστοποιημένο ΤΝΔ μπορεί να βοηθήσει τον μηχανικό στην αναζήτηση της χρήσης τομής. Στο MIT αναπτύχθηκε μια γενική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του αριθμού και του τύπου των βέλτιστων πειραματικών σχεδιάσεων για εκπαίδευση ΤΝΔ και των συνθηκών υπό τις οποίες λαμβάνονται τα δεδομένα. Η ανάγκη αυτή προκύπτει εφ'ενός από το μεγάλο κόστος για την απόκτηση πειραματικών δεδομένων από την κατασκευή ΟΚ και εφ'ετέρου από την έλλειψη κάποιου θεωρητικού υπόβαθρου που να προσδιορίζει τον αριθμό των απαραίτητων δεδομένων για την εκπαίδευση των ΤΝΔ. Σε αυτή την περίπτωση, ο σκοπός είναι να προσδιοριστεί αν η βέλτιστη πειραματική σχεδίαση μοιάζει με τις πραγματικές συνθήκες.

- **Έλεγχος διεργασιών.** Τα ΤΝΔ έχουν χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο διαφόρων διεργασιών. Η Korin Corporation τα χρησιμοποίησε στον έλεγχο κατασκευής ηλιακών κυψελίδων. Οι ερευνητές των εργαστηρίων Bell κατασκεύασαν

ένα TND για τον έλεγχο του χρόνου χάραξης λογικών πυλών με πλάσμα ιόντων. Μετά από εκπαίδευση πολλών μηνών σε πραγματικό χρόνο και σε πραγματικά δεδομένα από wafers, το TND μπορεί να χειριστεί, χωρίς την επέμβαση ανθρώπινου παράγοντα, το μηχάνημα χάραξης. Εκτός από τον περιορισμό της μεταβλητότητας της παραγωγής, την αύξηση της παραγωγικότητας και την μείωση του κόστους, το TND συμβάλλει και στην αύξηση του ωφέλιμου χρόνου ζωής του χαρακτηριστικού εξοπλισμού.

- **Διάγνωση διεργασιών.** Ένας όμιλος εταιριών (Texas Inst. Neurodyne Lam Research) αναπτύσσει ένα χαρακτηριστικό πλάσματος που θα συνδυάσει συμπίεση δεδομένων και διάγνωση σφαλμάτων με χρήση TND και έμπειρων συστημάτων. Το υβριδικό σύστημα μπορεί ευκολότερα να αποκτήσει και να συντηρήσει γνώσεις, καθώς επίσης να εξάγει "υπονοούμενες" γνώσεις, με χρήση TND, και την βοήθεια προκαθορισμένων κανόνων.

Πίνακας 8. Εφαρμογές των TND στην κατασκευή OK.

Εταιρία	Μοντελοποίηση	Βελτιστοποίηση	Έλεγχος	Διάγνωση	Εμπορικά προϊόν
AT&T	x		x		
DuPont	x				x
Korh			x		
Intel				x	
National Sem	x				
Pavilion	x		x		x
TI/NO/Lam			x	x	
Georgia Tech	x	x	x	x	
MIT		x	x	x	
University of California	x	x			

Ας δούμε τι συμβαίνει κατά την λειτουργική σχεδίαση των OK που έχουν ως δομικές μονάδες τις λογικές πύλες AND, OR και NOT. Οι σχεδιαστές OK γνωρίζουν ότι είναι αδύνατη η ενσωμάτωση ορισμένων αριθμητικών πράξεων, όπως ο πολλαπλασιασμός και ο έλεγχος ισοτιμίας, σε PLA (programmable logic arrays). Επομένως ο εκ των προτέρων υπολογισμός του αριθμού των λογικών κυκλωμάτων για την πραγματοποίηση αυτών των πράξεων, δηλαδή του μεγέθους της επιφανείας του OK, είναι μεγάλης πρακτικής αξίας. Έχει αποδειχτεί πχ. ότι σε κάποιο λογικό κύκλωμα περιορισμένου βάθους, το κάτω όριο του αριθμού των λογικών πυλών για τον έλεγχο ισοτιμίας είναι μια εκθετική συνάρτηση. Επομένως, κάποιο κύκλωμα ισοτιμίας, που καταλαμβάνει πολυωνυμική περιοχή στο OK, θα εισάγει απεριόριστη χρονική καθυστέρηση. Παρόμοια αποτελέσματα υπάρχουν για τις πράξεις πολλαπλασιασμού και διαίρεσης, όπου η καθυστέρηση είναι $O(\log n)$ (n είναι ο αριθμός των bit εισόδου). Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται στην περιορισμένη υπολογιστική ισχύ των λογικών πυλών.

Για την άρση αυτών των περιορισμών χρησιμοποιείται ως υπολογιστική μονάδα κάποιο TND πολυωνυμικού μεγέθους. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα μονοκατευθυντικό TND του οποίου τα βάρη λαμβάνουν, για πρακτικούς λόγους, μόνον ακέραιες τιμές και περιορίζονται από κάποιο πολυωνυμική συνάρτηση του αριθμού των εισόδων n ($|w| \leq f(n)$ είναι μια θετική σταθερά). Ως συνάρτηση μεταφοράς των TN χρησιμοποιείται η συνάρτηση κατωφλίου με τιμές $+1$ -1 . Θεωρούμε ότι κάθε επίπεδο TN εισάγει έναν χρονικό κύκλο καθυστέρησης και ότι οι υπολογισμοί των TN που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο γίνονται παράλληλα.

Το άθροισμα δύο αριθμών με μήκος n bits μπορεί να υπολογιστεί από κάποιο TND με ένα κρυφό επίπεδο, όπως και το άθροισμα n αριθμών με μήκος $\log n$ bits.

Ακόμη το άθροισμα n αριθμών με μήκος n bits μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα δύο αριθμών με μήκος $O(n)$ από κάποιο ΤΝΔ με τρία κρυφά επίπεδα. Έτσι το γινόμενο δύο αριθμών με n bits μπορεί να υπολογιστεί από κάποιο ΤΝΔ με τρία κρυφά επίπεδα. Τέλος, η ταξινόμηση σε αύξουσα σειρά n αριθμών με n bits ο καθένας, μπορεί να γίνει από κάποιο ΤΝΔ με τέσσερα κρυφά επίπεδα (ως έξοδος λαμβάνεται η θέση κάθε αριθμού στην λίστα).

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε, ότι η υλοποίηση των προηγούμενων συναρτήσεων με σχετικά μικρού μεγέθους (βάθους) ΤΝΔ, αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην κατασκευή ΟΚ (αν δεχτούμε ότι οι ΤΝ μπορεί να κατασκευαστούν από αναλογικά εξαρτήματα χαμηλού κόστους), δεδομένων των σημαντικών προβλημάτων κατασκευής αυτών των συναρτήσεων από λογικά κυκλώματα. Τα αποτελέσματα μπορεί να επεκταθούν για πιο πολύπλοκες αριθμητικές συναρτήσεις όπως η διαίρεση, η εκθετική συνάρτηση και η τετραγωνική ρίζα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΤΡΙΒΗ ΚΑΙ ΘΦΟΡΑ

3.1. ΤΡΙΒΗ

Τριβή ονομάζουμε την αντίσταση στην κίνηση που αναπτύσσεται όταν ένα σώμα κινείται ή τείνει να κινηθεί πάνω σε ένα άλλο.

Τα σώματα μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Ανάλογα με τη φύση των σωμάτων έχουμε τα παρακάτω είδη τριβής.

- Μηχανική τριβή όταν και τα δύο σώματα είναι στερεά.
- Υδροδυναμική τριβή όταν το ένα σώμα είναι στερεό και άλλο υγρό.
- Αεροδυναμική τριβή όταν το ένα σώμα είναι στερεό και το άλλο αέριο.

Ανάλογα με το είδος της κίνησης έχουμε.

- Την τριβή ολίσθησης όταν το ένα σώμα ολισθαίνει πάνω στο άλλο.
- Την τριβή κύλισης όταν το ένα σώμα κυλίεται πάνω στο άλλο.

Δυνάμεις τριβής αναπτύσσονται επίσης κατά την κίνηση αερίων και υγρών μεταξύ των μορίων τους. Το είδος αυτό της τριβής το ονομάζουμε εσωτερική τριβή.

Όταν έχουμε τριβή μεταξύ στερεών σωμάτων, οι επιφάνειες επαφής μπορεί:

- Να έρχονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους και τότε έχουμε ξηρή τριβή.
- Να διαχωρίζονται από ένα στρώμα λιπαντικού και τότε έχουμε υγρή τριβή.
- Να υπάρχουν σημεία άμεσης επαφής και σημεία διαχωρισμού από στρώμα λιπαντικού και τότε έχουμε την ενδιάμεση κατάσταση της ημιυγρής τριβής.

3.2. ΦΘΟΡΑ

Φθορά ονομάζουμε την απόσπαση υλικού από τις στερεές επιφάνειες εξ αιτίας της μηχανικής ενέργειας.

Το αντικείμενο της φθοράς είναι σχεδόν ανυπολόγιστης οικονομικής σημασίας, γιατί είναι ο παράγοντας αυτός, που περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο καθορίζει τη χρήσιμη ζωή των περισσότερων μηχανολογικών μηχανισμών.

Το χαρακτηριστικό της διαδικασίας της φθοράς είναι ότι προχωρά πολύ αργά και η ποσότητα του υλικού που φθείρεται είναι πολύ μικρή. Έτσι για παράδειγμα, ένα καινούργιο αυτοκίνητο που ζυγίζει 1000 Kgr μπορεί να αχρηστευθεί εξ αιτίας της φθοράς, χάνοντας μόνο 200 gr υλικού από κρίσιμες φθειρόμενες επιφάνειες.

Είναι αξιοσημείωτο ότι παρά τη μεγάλη σημασία του θέματος, η συστηματική μελέτη της διαδικασίας της φθοράς άρχισε τα τελευταία χρόνια.

Ένας λόγος για την καθυστέρηση της μελέτης της φθοράς είναι, ότι ο ρυθμός φθοράς είναι πολύ χαμηλός.

Δεν υπήρχε πριν μερικά χρόνια ένας εύκολος τρόπος συνεχούς μελέτης της

διαδικασίας φθοράς.

Αυτό άλλαξε με την ανακάλυψη των ραδιοϊσοτόπων το 1940, που σαν αποτέλεσμα είχε να είναι δυνατή η τεχνική της μέτρησης πολύ μικρών ποσοτήτων υλικού που μεταφέρεται ή χάνεται. Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι με την χρησιμοποίηση ραδιοϊσοτόπων είναι δυνατή η μέτρηση απώλειας υλικού από την επιφάνεια δοντιού μετά από μια διαδρομή της οδοντόβουρτσας.

Το εναρκτήριο σημείο της μοντέρνας θεωρείας για τη φθορά είναι οι κλασικές έρευνες των BOWDEN και TABOR πάνω στη φύση της τριβής και η δουλειά του HOLM στις ιδιότητες των ηλεκτρικών επαφών.

Το 1939 οι BOWDEN και TABOR έβγαλαν τη γνωστή σχέση που σχετίζει την πραγματική με την φαινόμενη επιφάνεια επαφής που προκύπτει όταν μια επιφάνεια πιεσθεί πάνω σε μια άλλη. Σχ. 3.1

Η πραγματική επιφάνεια επαφής δίνεται από την εξίσωση:

$$A_{\tau} = \frac{L}{H} \quad (3.1.1.)$$

όπου:

A_{τ} : πραγματική επιφάνεια επαφής

L: το φορτίο

H : η σκληρότητα διείδυσης της επιφάνειας.

Καθώς το ονομαστικό φορτίο μεταξύ των επιφανειών αυξάνει, συμβαίνει πρώτα ελαστική και μετά πλαστική παραμόρφωση. Έτσι δημιουργείται η πραγματική επιφάνεια επαφής. Υπολογισμοί και μεταγενέστερες μετρήσεις έδειξαν ότι, η πραγματική επιφάνεια επαφής για φορτία συνήθως μεγέθους σε μηχανολογικά μηχανήματα ήταν πολύ μικρότερη από την φαινόμενη επιφάνεια επαφής.

Το επόμενο βήμα ήταν να εφαρμόσουμε αυτές τις ιδέες στην ερμηνεία των γνωστών νόμων της τριβής και ιδιαίτερα στην παρατήρηση ότι όταν δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή, η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της δύναμης μεταξύ των επιφανειών και ανεξάρτητη της φαινόμενης επιφάνειας επαφής. Η ιδέα της πραγματικής επιφάνειας επαφής μεταξύ των επιφανειών εξηγεί την ανεξαρτησία της δύναμης τριβής από την φαινομένη επιφάνεια.

Έτσι εύκολα φθάσαμε στην ερμηνεία της δύναμης τριβής σαν τη δύναμη που απαιτείται για την διάτμηση των συνδέσεων που αποτελούν την πραγματική επιφάνεια επαφής.

Διακρίνουμε πέντε (5) είδη φθοράς:

1. Φθορά κόπωσης
2. Φθορά λείανσης
3. Φθορά πρόσφυσης
4. Φθορά χημικής διάβρωσης

5. Φθορά μηχανικής διάβρωσης

1. ΦΘΟΡΑ ΚΟΠΩΣΗΣ

Με την πρώτη ματιά η κόπωση φαίνεται να είναι η απλούστερη φθορά μηχανισμού μια και βασίζεται στην επίδραση καταπονήσεων σε επιφάνεια, χωρίς να έχουμε επαφές στερεών σωμάτων. Αυτό προκύπτει από την παρατήρηση ότι τα αποτελέσματα της κόπωσης παρατηρήθηκαν σε έδρανα όπου οι επιφάνειες ήταν διαχωρισμένες από παχύ στρώμα λιπαντικού.

Τα αποτελέσματα της κόπωσης τα έχουμε συνήθως όταν έχουμε επαναλαμβανόμενη καταπόνηση σε κυκλική ή ευθύγραμμη επαφή.

Στην κόπωση αναπτύσσεται θραύση κάτω από την επίδραση εναλλασσόμενων δυνάμεων. Δεν θα είχαμε αστοχία υλικού αν επιβάλλουμε μόνο θλίψη ή μόνο εφελκυσμό.

Η κόπωση είναι φαινόμενο συνηθισμένο στις κυλιόμενες επιφάνειες, όπως οι σφαίρες στα ρουλεμάν.

Συγκρίνοντας την κόπωση επιφανειών σε κυλιόμενες επιφάνειες με την συνήθη κόπωση του κύριου όγκου των υλικών, υπάρχουν δύο διαφορές.

1. Οι αυξομειώσεις στο χρόνο αστοχίας, ο χρόνος ζωής είναι πιο αυστηρός στις κυλιόμενες επαφές.
2. Στην κόπωση του κύριου όγκου των υλικών υπάρχει ένα συγκεκριμένο όριο δύναμης για συγκεκριμένο υλικό κάτω από το οποίο το υλικό δεν έχει πρόβλημα φθοράς από κόπωση. Τέτοιο όριο δεν έχει ανακαλυφθεί στην περίπτωση της κόπωσης επιφάνειας.

Για να καταλάβουμε πως και που σχηματίζονται οι ρωγμές από την κόπωση επιφάνειας πρέπει να λάβουμε υπόψη την φύση των καταπονήσεων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια.

Η θεωρία του HERTZ για τις ελαστικές επαφές λέει ότι η μέγιστη τάση συμπίεσης δημιουργείται στην επιφάνεια και η μέγιστη συνεχής διατμητική τάση σε απόσταση y κάτω από την επιφάνεια. (π.χ. στην περίπτωση επαφής δύο κυλίνδρων με εύρος επαφής $2a_H$ το y είναι $0,78 a_H$).

Σε συνθήκες κυλιόμενων επιφανειών η σημαντικότερη παράμετρος καταπόνησης είναι η μέγιστη ανάστροφη διατμητική τάση και αυτή βρίσκεται πλησιέστερα προς την επιφάνεια από τη μέγιστη συνεχή διατμητική τάση.

Αν η επαφή υπόκειται και σε σημαντικές επιφανειακές δυνάμεις έλξης, τότε η θέση των παραπάνω μέγιστων διατμητικών τάσεων αλλάζει και πηγαίνει στην περιοχή της επιφάνειας.

2. ΦΘΟΡΑ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

Το φαινόμενο της λείανσης το έχουμε όταν δύο σώματα έλθουν σε άμεση επαφή και η επιφάνεια του ενός είναι πολύ πιο σκληρή από την επιφάνεια του

άλλου.

Η σκληρότερη επιφάνεια πιέζεται βίαια μέσα στην μαλακότερη, με ταυτόχρονη πλαστική ροή υλικού της μαλακότερης επιφάνειας γύρω από τα σημεία της κύριας επιφάνειας. Όταν αναπτυχθεί επαπτομενική κίνηση η σκληρότερη επιφάνεια θα κινηθεί οργώνοντας το μαλακότερο υλικό.

Στη βιομηχανία η φθορά- λείανση είναι πολύ διαδεδομένη. Υπολογίζεται ότι περίπου το 50% της φθοράς που έχουμε στις εγκαταστάσεις προέρχεται από φθορά λείανσης.

Σαν αποτέλεσμα της ποικιλίας των συνθηκών είναι να διακρίνουμε διάφορους τύπους φθοράς λείανσης στην πράξη. Κάνουμε διάκριση σε λείανση δύο σωμάτων και σε λείανση τριών σωμάτων. Για παράδειγμα η λείανση δύο σωμάτων συναντιέται συχνά στη μεταφορά ορυκτών χύμα, και η λείανση τριών σωμάτων κατά την κατεργασία των ορυκτών και κατά την είσοδο ξένου σώματος σε έδρανα.

Μπορούμε επίσης να κάνουμε διάκριση σε:

- Λείανση γλυφάνου. Παράδειγμα: φθορά φτυαριών, φθορά σφυριών σε μηχανισμό κρουστικού κονιορτοποιητή.
- Τροχιστική λείανση. Παράδειγμα: φθορά τροχιστικών δίσκων

3. ΦΘΟΡΑ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ

Ενώ ο μηχανισμός της φθοράς στην κόπωση επιφάνειας και στη λείανση οφείλεται κατά κύριο λόγο στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και τάσεις και στη διαδικασία της παραμόρφωσης, στη φθορά πρόσφυσης το σημαντικότερο λόγο έχουν οι αλληλοεπιδράσεις των υλικών.

Όταν δύο σώματα στερεά έρχονται σε επαφή, υφίστανται την επίδραση δυνάμεων VAN DER WAALS. Έτσι σχηματίζονται ισχυρές συνδέσεις πρόσφυσης.

Για να έχουμε φθορά πρόσφυσης θα πρέπει να λάβει χώρα θραύση στην επιφάνεια του ενός ή και των δύο σωμάτων.

Ενώ στις άλλες περιπτώσεις φθοράς απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα για να φθάσουμε σε ένα βαθμό που θα έχουμε τη φθορά, στη φθορά πρόσφυσης αυτό γίνεται απότομα.

Ο μηχανισμός της φθοράς πρόσφυσης εξαρτάται από τις παραμέτρους της πρόσφυσης και της θραύσης.

Επειδή, τόσο η πρόσφυση όσο και η θραύση εξαρτώνται από τις ακαθαρσίες της επιφάνειας και την επίδραση του περιβάλλοντος, είναι πολύ δύσκολο να βρούμε σχέσεις μεταξύ των μεγεθών της πρόσφυσης και των ιδιοτήτων των υλικών.

4. ΦΘΟΡΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Στη φθορά χημικής διάβρωσης, η φθορά είναι αποτέλεσμα της αλληλοεπίδρασης μεταξύ των δύο σωμάτων που έρχονται σε επαφή και του περιβάλλοντος.

Αν οι δύο επιφάνειες αντιδρούν ενεργά με το περιβάλλον, η τριβή των επιφανειών μεταξύ τους έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή απομάκρυνση των προϊόντων της αντίδρασης με το περιβάλλον. Καθώς τα προϊόντα της αντίδρασης περιέχουν και υλικά από τις επιφάνειες, έχουμε απομάκρυνση ύλης από τις επιφάνειες.

Στην περίπτωση της φθοράς χημικής διάβρωσης ο όλος μηχανισμός μπορεί να ερμηνευθεί με την αλληλεπίδραση τριών παραγόντων, των στερεών επιφανειών α και β και του περιβάλλοντος γ. Η αλληλεπίδραση αυτή περιγράφεται με την παρακάτω κυκλική διαδικασία.

1. Στο πρώτο στάδιο οι επιφάνειες α και β αντιδρούν με το περιβάλλον γ. Τα προϊόντα της αντίδρασης των α,γ και β,γ σχηματίζονται στις επιφάνειες των α και β αντίστοιχα.

2. Στο δεύτερο στάδιο έχουμε τη φθορά των προϊόντων αντίδρασης. Όταν συμβεί αυτό, νέα επιφάνεια δημιουργείται σε κάθε σώμα που αντιδρά με το περιβάλλον και έτσι επαναλαμβάνεται το πρώτο στάδιο.

Σαν αποτέλεσμα της θερμικής και μηχανικής ενεργοποίησης τα σώματα υφίστανται τις παρακάτω αλλαγές:

- Η αντίδραση αυξάνεται εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας και ο σχηματισμός του επιφανειακού στρώματος επιταχύνεται.

- Οι μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων αλλάζουν. Γενικά έχουμε μια τάση για ψαθυρή θραύση.

Για να μελετήσουμε το φαινόμενο της φθοράς χημικής διάβρωσης, εκτός από τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης και της πρόσφυσης, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και η Χημεία των αλληλεπιδρόμενων επιφανειών καθώς και την κατανομή της ενέργειας τριβής.

5. ΦΘΟΡΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Ορίζουμε σαν φθορά μηχανικής διάβρωσης, την διαδικασία απομάκρυνσης υλικού από επιφάνεια σώματος, εξαιτίας της βίαιης πρόσκρουσης σε αυτό στερεών ή υγρών σωματιδίων.

Παράδειγμα φθοράς μηχανικής διάβρωσης είναι η φθορά που υφίστανται τα βράχια από τα κύματα της θάλασσας όπως επίσης η φθορά που βλέπουμε σε αρχαία κτίσματα από τις αμμοθύελλες. Στο χώρο της Μηχανολογίας παράδειγμα φθοράς μηχανικής διάβρωσης είναι η φθορά που υφίστανται οι αεροστρόβιλοι από την πρόσκρουση σε αυτούς σωματιδίων της ατμόσφαιρας.

Για τη μελέτη του φαινομένου της φθοράς μηχανικής διάβρωσης έχουν γίνει πειράματα με τη χρησιμοποίηση επιφανειών από υλικά που θέλουμε να μελετήσουμε που πάνω τους γίνεται βίαιη πρόσκρουση σωματιδίων (π.χ. ατσάλι να σφαιρίδια ή αμμοβολή).

Η ταχύτητα των σωματιδίων που προσκρούουν έφτασε και μέχρι 105m/sec. Από τα πειράματα αυτά βρέθηκαν ότι παράγοντες που επιδρούν στη φθορά μηχανικής διάβρωσης είναι:

- Η ταχύτητα της πρόσκρουσης.
- Η μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού.
- Τα χαρακτηριστικά των προσκρουόμενων σωματιδίων ,το μέγεθος και η σκληρότητά τους.

3.2.1.Ερπυσμός και αντοχή σε κρούση πολυμερών

ο ερπυσμός και η αντοχή σε κρούση των πολυμερών εξηγούνται από την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών, διότι οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από το χρόνο.

Όταν η φόρτιση εφαρμόζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα και μάλιστα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, συμβαίνει μια ιξώδη ροή του πολυμερούς. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ερπυσμός (creep). Μεγαλύτερη θερμοκρασία ή τάση εντείνουν το ανωτέρω φαινόμενο.

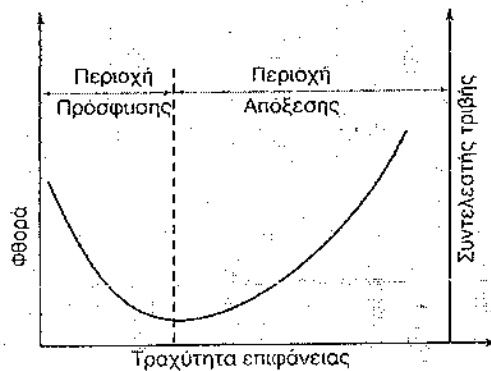
Η θερμοκρασία θερμικής κάμψης (heat deflection temperature, HDT) είναι μια ιδιότητα των πολυμερών που εκφράζει τη θερμοκρασία υπό την οποία το πολυμερές καταπονούμενο με ένα συγκεκριμένο φορτίο υφίσταται μια δεδομένη παραμόρφωση. Υψηλές HDT έχουν σαν αποτέλεσμα την αυξημένη αντοχή του υλικού σε ερπυσμό.

Όταν σε ένα πολυμερές επιβληθεί μια φόρτιση μεγάλης ταχύτητας (μεγάλου ρυθμού παραμόρφωσης), δεν υπάρχει χρόνος για να κινηθούν οι μακρομοριακές αλυσίδες, άρα να πραγματοποιηθεί πλαστική παραμόρφωση, με αποτέλεσμα να επακολουθήσει ψαθυρή θραύση του υλικού. Έτσι σε αυτή την περίπτωση, λέγεται ότι το πολυμερές παρουσιάζει μικρή αντοχή σε κρούση.

3.3. ΤΡΙΒΗ- ΦΘΟΡΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς τους, οι μηχανισμοί τριβής και φθοράς των πολυμερών συνδέονται άμεσα με ιδιότητες εξαρτώμενες ισχυρά από το χρόνο και τη θερμοκρασία. Λόγω της ευαισθησίας των μακρομοριακών αλυσίδων σε μηχανικές φορτίσεις, αλλά και σε περιβαλλοντολογικούς παράγοντες, οι παράμετροι του τριβοσυστήματος έχουν μεγάλη επίδραση στο μηχανισμό τριβής.

Η μελέτη της φθοράς των πολυμερών κατά την τριβή βρίσκεται ακόμη υπό ερευνητική παρατήρηση, ωστόσο έχει εκτιμηθεί ότι η τραχύτητα της επιφάνειας του ανταγωνιστικού υλικού επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την τριβολογική συμπεριφορά του πολυμερούς (σχήμα 3.1). Με την αύξηση της τραχύτητας ο συντελεστής τριβής και ο ρυθμός φθοράς των πολυμερών μειώνεται ως μία οριακή τιμή. Για υψηλότερες τιμές τραχύτητας, τα δύο μεγέθη αυξάνουν. Η ελάχιστη αυτή τιμή αποτελεί το όριο μεταξύ δύο περιοχών, που κυριαρχούν διαφορετικοί μηχανισμοί τριβής. Ενώ, για χαμηλές τιμές της τραχύτητας (RA) κυριαρχεί ο μηχανισμός της πρόσφυσης, για υψηλότερες τιμές κυριαρχεί ο μηχανισμός της απόξεσης.



ΣΧΗΜΑ 3.1 Ο συντελεστής τριβής και ο ρυθμός φθοράς των θερμοπλαστικών εξαρτάται από την Επιφανειακή τραχύτητα του ανταγωνιστικού υλικού

3.4. ΦΘΟΡΑ - ΤΡΙΒΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τόσο η φθορά όσο και η τριβή είναι όροι που χρησιμοποιούνται συχνά, για την περιγραφή φαινομένων της καθημερινής μας ζωής, των οποίων οι μηχανισμοί δεν έχουν πλήρως προσδιοριστεί. Η εξέταση των μηχανισμών της φθοράς και της τριβής παραμένει φαινομενολογική. Μπορούμε να πούμε ότι ξέρουμε ποιοί παράγοντες επηρεάζουν την τριβολογική συμπεριφορά των υλικών, αλλά όχι το πώς ακριβώς παρεμβαίνουν σ' αυτόν το μηχανισμό.

Γενικά, λοιπόν, τα κεραμικά εμφανίζουν μικρή φθορά κατά την εκτριβή τους, ιδιότητα που συνδέεται με την υψηλή τους σκληρότητα, την έλλειψη πλαστικότητας, τις ατέλειες δομής (εγκλείσματα, πόροι, ρωγμές), τη θερμική και χημική τους σταθερότητα.

Λόγω της καλής τους συμπεριφοράς σε τριβή τα κεραμικά βρίσκουν χρήσεις ως λειαντικά, για επιστρώσεις κοπτικών εργαλείων, κλπ.

3.5. ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Τα λιπαντικά χρησιμοποιούνται για την ομαλή λειτουργία των μηχανών και των μηχανισμών και αποσκοπούν στην ελάττωση της τριβής και της φθοράς των κινουμένων μεταλλικών μερών.

Με τη χρησιμοποίηση των λιπαντικών μετατρέπουμε την ξηρή τριβή, μεταξύ δύο μεταλλικών επιφανειών, σε υγρή. Έτσι επιτυγχάνουμε την ελάττωση σε μεγάλο βαθμό, τόσο του συντελεστή τριβής όσο και της φθοράς.

Ο ρόλος του λιπαντικού στη σωστή λειτουργία και συντήρηση ενός μηχανήματος είναι πολύ σημαντικός. Η διάρκεια ζωής ενός μηχανήματος εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του σωστού λιπαντικού και την σωστή χρησιμοποίησή του.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση ενός ακατάλληλου λιπαντικού, ή κακή χρησιμοποίηση ενός κατάλληλου λιπαντικού, δεν δείχνει άμεσα τα καταστροφικά αποτελέσματα στη ζωή ενός μηχανήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται μετά από αρκετό χρόνο και όταν η βλάβη έχει προχωρήσει τόσο, ώστε να απαιτούνται πολύ σημαντικές επισκευές, ή έχει αχρηστεύσει το μηχάνημα.

Ενώ η αγορά ενός λιπαντικού, σαν δαπάνη, αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό των εξόδων συντήρησης (περίπου 5%), η μη σωστή λίπανση μπορεί να επιβαρύνει το κόστος των προϊόντων με ένα πολύ σημαντικό ποσοστό (σταματήματα παραγωγής, εργατικά για αποκατάσταση βλαβών, κόστος ανταλλακτικών κ.α.).

Πριν μερικά χρόνια, ο τομέας της λίπανσης ήταν παραμελημένος ή και άγνωστος, τόσο στους κατασκευαστές μηχανημάτων όσο και στους πελάτες τους. Σήμερα όμως έγινε κατανοητό από όλους, πόσο σημαντική είναι η σωστή λίπανση, με αποτέλεσμα να θεωρείται σαν το σημαντικότερο ενός οργανωμένου προγράμματος προληπτικής συντήρησης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνει πλέον ο κατασκευαστής, στη σωστή σύνθεση λιπαντικού και στις οδηγίες χρήσης του, για την σωστότερη και αποδοτικότερη λειτουργία του μηχανήματος.

Η τυποποίηση και ενοποίηση των λιπαντικών (λιπαντικά αυτοκινήτων, βιομηχανικά λιπαντικά, γράσσα κ.λπ.) έχει γίνει μετά τη δημιουργία οργανισμών όπως:

- SAE (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS)
- API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE)
- ASLE (AMERICAN SOCIETY OF LUBRICATION ENGINEERS)
- ISO (INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION)
- NIGI (NATIONAL LUBRICATING GREASE INSTITUTE) κ.α.

3.5.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ

Οι βασικές ιδιότητες που απαιτούμε από τα λιπαντικά είναι:

α. Λιπαντική ικανότητα.

Με τον όρο εννοούμε την ικανότητα του λιπαντικού να σχηματίζει λιπαντικό στρώμα μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών, που θα διατηρείται κατά τις συνθήκες λειτουργίας και θα είναι ικανό να φέρει τα φορτία που αναπτύσσονται.

Στη λιπαντική ικανότητα των λιπαντικών, οφείλεται η μετατροπή της ξηρής τριβής σε υγρή, με αποτέλεσμα την μείωση της τριβής και της φθοράς.

β. Ψυκτική ικανότητα.

Είναι η ικανότητα του λιπαντικού να παίρνει ποσά θερμότητας από τα σημεία τριβής των μεταλλικών επιφανειών και να παρεμποδίζει έτσι την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η ικανότητα αυτή έχει σχέση με την ειδική θερμότητα και τη θερμική αγωγιμότητα του λιπαντικού.

γ. Σταθερότητα.

Είναι η ικανότητα του λιπαντικού να εμποδίζει αλλοιώσεις της ύλης του, κάτω από τις συνθήκες που δημιουργούνται με την λειτουργία του μηχανήματος. Ένα λιπαντικό μπορεί να είναι άριστο στην αρχή της χρησιμοποίησής του και με την πάροδο του χρόνου να παθαίνει τέτοιες αλλοιώσεις, που να κάνει την χρησιμοποίησή του καταστρεπτική για το μηχάνημα (π.χ. τα ζωικά ή φυτικά λάδια και λίπη). Σε λιπαντικά που έχουν σταθερότητα αποφεύγουμε καταστάσεις όπως η παραπάνω.

δ. Παθητικότητα ή αδράνεια.

Είναι η ιδιότητα του λιπαντικού να μην δημιουργεί διαβρωτικές ουσίες που θα μπορούσαν να προσβάλλουν τις μεταλλικές επιφάνειες. Όπως επίσης η ικανότητά του να παρέχει αντιδιαβρωτική προστασία στις επιφάνειες, από τις εξωτερικές συνθήκες.

Εκτός από τις τέσσερις παραπάνω ιδιότητες που απαιτούμε να έχει το λιπαντικό, υπάρχουν κι άλλες που επιθυμούμε να έχει, ανάλογα με τη χρήση του, όπως:

- Γαλακτωματοποιητικές ιδιότητες στην περίπτωση λίπανσης εργαλείων κοπής.
- Απογαλακτωματοποιητικές ατμοστροβίλων.
- Καθαριστικές ιδιότητες στην περίπτωση λίπανσης μηχανών εσωτερικής καύσης.
- Μονωτικές ιδιότητες στην περίπτωση λίπανσης ηλεκτρικών μετασχηματιστών και διακοπών.
- Αντοχή στην οξειδωση: λόγω επαφής των λαδιών με τον αέρα, την παρουσία καταλυτών και την θερμοκρασία. Η οξειδωση εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας κάθε περίπτωσης. Τα αποτελέσματα αυτού του φαινομένου είναι:
 - α) Το λάδι γίνεται πιο παχύρρευστο με επακόλουθο την αύξηση των εσωτερικών τριβών και της θερμοκρασίας λειτουργίας.
 - β) Δημιουργία λάσπης που επικάθεται στα τοιχώματα των κάρτερ, των κιβωτίων κ.λπ. παρεμποδίζοντας έτσι την απαγωγή της θερμότητας.
 - γ) Αύξηση των ανθρακούχων υπολειμμάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών και προκαλούν φθορές.
- Σημείο ροής και σημείο θόλωσης: είναι η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία το λάδι εξακολουθεί να ρέει. Αποτελεί χρήσιμη πληροφορία της κατώτερης θερμοκρασίας, στην οποία μπορεί το λάδι να ρέει στα συστήματα λίπανσης με βαρύτητα -αλλά δεν μας παρέχει πληροφορίες για την συμπεριφορά του λαδιού στα συστήματα λίπανσης με πίεση ή όταν το λάδι αναδεύεται, με αποτέλεσμα να καταστρέφεται το κρυσταλλικό πλέγμα της παραφίνης.
- Το σημείο θόλωσης είναι η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η κρυστάλλωση της παραφίνης, οπότε το λάδι γίνεται θολό. Το σημείο θόλωσης είναι συνήθως ανώτερο του σημείου ροής.
- Οξύτητα και αλκαλικότητα: Οξύτητα είναι ο αριθμός των χιλιοστογράμμων ΚΟΗ, που απαιτούνται για την εξουδετέρωση ενός γραμμαρίου όξινου λαδιού. Δηλαδή ο αριθμός που δίνει μια ένδειξη για την κατάσταση του λαδιού, σε σχέση με τα οξέα

που περιέχονται σε αυτό, που δημιουργούνται από τα προϊόντα της καύσης που σχηματίζονται στους κινητήρες ή από την οξείδωση του λαδιού.

Αλκαλικότητα είναι η ποσότητα του οξέος σε χιλιοστόγραμμα KOH, που απαιτούνται για την εξουδετέρωση ενός γραμμαρίου αλκαλικού λαδιού, και δίνει ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας των πρόσθετων που περιέχονται σε ένα λάδι. Αν είναι χαμηλός, σημαίνει πως τα πρόσθετα έχουν καταναλωθεί για την αντιμετώπιση των προϊόντων της οξείδωσης, οπότε το λάδι δεν προστατεύει ικανοποιητικά τα μέταλλα της μηχανής.

- Αριθμός απογαλακτωματοποίησης: είναι απαραίτητος στα λάδια που χρησιμοποιούνται για την λίπανση των ατμομηχανών, ατμοστροβίλων, των εδράνων στα έλαστρα των χαλυβουργιών και γενικά σε όλες τις περιπτώσεις όπου το λάδι μπορεί να έλθει σε επαφή με το νερό. Η παρουσία του νερού στο λάδι δημιουργεί γαλάκτωμα που είναι διαβρωτικό για τις επιφάνειες που λιπαίνει.
- Σημείο ανάφλεξης, καύσης και αυτανάφλεξης: το σημείο ανάφλεξης είναι η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία ένα λάδι θερμαινόμενο παράγει ατμούς, που μπορούν στιγμιαία να αναφλεγούν στο πλησίασμα μιας φλόγας. Αν θερμάνουμε το λάδι σε υψηλότερη θερμοκρασία έτσι ώστε να μην γίνει μόνο στιγμιαία ανάφλεξη αλλά να έχουμε παραγωγή ατμών και διατήρηση της καύσης για 5 τουλάχιστον sec, η θερμοκρασία αυτή είναι το σημείο καύσης. Η κατώτερη θερμοκρασία που ένα λάδι αναφλέγεται, παρουσία αέρα ή οξυγόνου, χωρίς να πλησιάσει φλόγα, ονομάζεται σημείο αυτανάφλεξης και είναι πολύ ανώτερο του σημείου ανάφλεξης.
- Αντισκωριακή προστασία: η σκωρίαση των σιδηρών επιφανειών είναι μια χημική δράση που προχωρεί πολύ γρήγορα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος (αέρας, υγρασία) και μπορεί να τεθεί υπό έλεγχο με μεγάλη δυσκολία όταν αρχίσει. Οι αντισκωριακές ιδιότητες των λαδιών δεν είναι αρκετές για την αποτελεσματική προστασία των σιδηρών επιφανειών που είναι εκτεθειμένες στο περιβάλλον ή αποτελούν τα εσωτερικά τοιχώματα των μηχανών. Είναι λοιπόν απαραίτητη η καλή πρόσφυση των λαδιών πάνω στις προς προστασία επιφάνειες.

3.6. ΕΙΔΗ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ

Ανάλογα με την φυσική τους κατάσταση κατά την χρησιμοποίησή τους, χωρίζονται τα λιπαντικά σε:

- αέρια λιπαντικά
- υγρά λιπαντικά
- στερεά λιπαντικά.

3.6.1 ΑΕΡΙΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Στην πράξη χρησιμοποιείται μόνο ο αέρας. Πλεονεκτήματα του αέρα σαν λιπαντικό είναι:

- Η μεγάλη σταθερότητά του

- Η μεγάλη παθητικότητά του
- Ο μικρός συντελεστής τριβής.

Πλεονεκτήματα είναι:

- Μικρή ικανότητα λίπανσης κάτω από φορτίο
- Μικρή ψυκτική ικανότητα

Λίπανση με αέρα έχουμε σε περιπτώσεις όπου έχουμε υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα τα κοινά λιπαντικά να διασπώνται ή να απανθρακώνονται. Όπως επίσης σε περιπτώσεις που δεν θέλουμε να έλθει σε επαφή το λιπαντικό με την κατεργαζόμενη ύλη κ.α.

3.6.2 ΥΓΡΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ.

Στα υγρά λιπαντικά υπάγονται:

- Το νερό
- Τα ζωικά και φυτικά λίπη και λάδια
- Τα ορυκτέλαια
- Τα συνθετικά λιπαντικά

- ΝΕΡΟ - ΖΩΙΚΑ ΚΑΙ ΦΥΤΙΚΑ ΛΙΠΗ ΚΑΙ ΛΑΔΙΑ

Το νερό παρουσιάζει μεγάλη ψυκτική ικανότητα και μεγάλη σταθερότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχει όμως πολύ μικρή λιπαντική ικανότητα και μεγάλη διαβρωτική ενέργεια στις μεταλλικές επιφάνειες.

Τα ζωικά και φυτικά λίπη και λάδια έχουν πολύ καλή λιπαντική ικανότητα, δεν έχουν όμως παθητικότητα και σταθερότητα. Κατά τη χρήση τους οξειδώνονται εύκολα και μετατρέπονται σε παχύρρευστες ουσίες με μεγάλη οξύτητα, που είναι βλαβερές για τις μεταλλικές επιφάνειες.

- ΟΡΥΚΤΕΛΑΙΑ

Ορυκτέλαιο ονομάζουμε το υγρό που είναι μείγμα υδρογονανθράκων (προϊόντα διύλισης πετρελαίου) και διαφόρων άλλων χημικών ουσιών. Τα ορυκτέλαια συνδυάζουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό όλες τις βασικές ιδιότητες των λιπαντικών και είναι αρκετά οικονομικά. Γι' αυτό είναι το πιο διαδεδομένο λιπαντικό μέσο.

Μετά τον Β' παγκόσμιο πόλεμο οι διάφορες τεχνικές διύλισης για παραγωγή ορυκτελαίων είχαν βελτιωθεί τόσο, που δεν υπήρχαν πολλά περιθώρια για καλύτερη ποιότητα λαδιών από τα διυλιστήρια. Από την άλλη πλευρά, η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας δημιούργησε αυξημένες απαιτήσεις από τα λιπαντικά (υψηλές ταχύτητες, μεγάλα φορτία κ.λπ.). Έτσι άρχισαν να παράγονται μίγματα των

προϊόντων της διύλισης με διάφορες χημικές ουσίες. Τις ουσίες αυτές τις ονομάζουμε πρόσθετα ή βελτιωτικά ορυκτελαίων.

- ΣΥΝΘΕΤΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Τα σύνθετα λιπαντικά είναι ιδιαίτερες χημικές ενώσεις όπως εστέρες, πολυμερή κλπ που παρασκευάζονται συνθετικά.

Τα συνθετικά λιπαντικά είναι υγρά, αλλά μπορούν να στερεοποιηθούν με την προσθήκη στερεοποιητικών ουσιών.

- ΣΤΕΡΕΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

Τα στερεά λιπαντικά δεν λιώνουν κατά την χρησιμοποίησή τους, αλλά ενεργούν σαν στερεό στρώμα που παρεμβάλλεται μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών. Η λιπαντική ικανότητά τους οφείλεται στη δομή τους που αποτελείται από στρωματικά πλέγματα. Έτσι τα στρώματα απασχίζονται μεταξύ τους και μπορούν να ολισθαίνουν με μικρό συντελεστή τριβής.

Τα πιο γνωστά στερεά λιπαντικά είναι:

- Ο γραφίτης
- Το διθειούχο μολυβδένιο (MoS_2)

Ο γραφίτης και το διθειούχο μολυβδένιο χρησιμοποιούνται με την μορφή πάρα πολύ λεπτών αιωρημάτων, σε ορυκτέλαια ή συνθετικά λιπαντικά. Ο γραφίτης έχει χρησιμοποιηθεί επίσης και σε υδατικά διαλύματα.

- ΓΡΑΣΣΑ

Γράσσο ονομάζουμε ένα στερεό ή παχύρρευστο προϊόν διασποράς ενός παχυντή μέσα σε ένα υγρό λιπαντικό. Στο προϊόν αυτό μπορεί να περιέχονται και άλλα συστατικά που τους δίνουν πρόσθετες ιδιότητες. Σαν υγρά λιπαντικά για την παραγωγή γράσσων χρησιμοποιούνται ορυκτέλαια και συνθετικά λάδια. Κατά τη χρησιμοποίησή τους τα γράσσα συμπεριφέρονται σαν υγρά, γι' αυτό υπάγονται στα υγρά λιπαντικά.

Τα γράσσα χρησιμοποιούνται συνήθως αντί των λαδιών στις περιπτώσεις που το λιπαντικό πρέπει να διατηρεί την αρχική του θέση στον μηχανισμό, ιδιαίτερα όπου η δυνατότητα συμπλήρωσης ή αντικατάστασης είναι περιορισμένη. Τέτοιες συνθήκες λίπανσης μπορεί να οφείλονται στο σχεδιασμό του μηχανισμού, στο τρόπο κίνησης, στην ανάγκη να λειτουργεί το λιπαντικό και σαν στεγανοποιητικό, παρεμποδίζοντας τις διαρροές ή την είσοδο επιβλαβών ουσιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΦΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΡΙΒΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή τη μελέτη για να προβλεφθεί και να αναλυθεί η δυνατότητα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων ερευνήθηκε η συμπεριφορά των λεγόμενων ίνα πολυμερών υλικών. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν εισαχθεί πρόσφατα στην τριβολογία από τον Jones και άλλους το 1997. Η προκαταρκτική έρευνα των τεχνητών, νευρωνικών δικτύων προβλέπει τις τριβολογικές ιδιότητες. Η εργασία τους επεκτείνεται σε τρεις κατευθύνσεις.

- 1) Ο υψηλότερος αριθμός μεταβλητών εισαγωγής που χρησιμοποιείται και χαρακτηρίζει τα υλικά και τους πειραματικούς όρους είναι (10 αντί 6).
- 2) Η στατιστική τεχνική χρησιμοποιείται για να βελτιώνει τις ικανότητες του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Αυτή η τεχνική αυτόματα προσδιορίζει το βέλτιστο μέγεθος του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που καθορίστηκε πειραματικά από μια ομάδα ερευνητών.
- 3) Τέλος η ποιότητα των προβλέψεων αξιολογείται. Τα βελτιωμένα αποτελέσματα μπορεί να υπονοούν στο μέλλον περαιτέρω βελτιστοποιήσεις στις κατασκευές των δικτύων από μια αυξηνόμενη διαθεσιμότητα των στοιχείων μέτρησης.

4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Για την έρευνα των υλικών ένα ορισμένο ποσό των πειραματικών αποτελεσμάτων απαιτείται πρώτα να αναπτύξει ένα νευρωνικό δίκτυο με καλή απόδοση συμπεριλαμβανομένης της αρχιτεκτονικής του, των λειτουργιών κατάρτισης, των αλγορίθμων κατάρτισης και άλλων παραμέτρων που ακολουθούνται με τη μέθοδο της αξιολόγησης. Αφότου έχει μάθει να λύνει το δίκτυο τα προβλήματα βασισμένα σε αυτά τα σύνολα δεδομένων, τα νέα στοιχεία από την ίδια περιοχή γνώσης μπορούν έπειτα να τεθούν στο νευρωνικό δίκτυο προκειμένου να έχουμε ρεαλιστικές λύσεις. Η διαδικασία των νευρωνικών δικτύων για την έρευνα των υλικών μπορεί να συνοψιστεί από την άποψη των ακόλουθων σταδίων:

- 1) Η συλλογή των βάσεων δεδομένων: ανάλυση και προεπεξεργασία των στοιχείων.
- 2) Η κατάρτιση του νευρωνικού δικτύου: αυτό περιλαμβάνει την επιλογή της αρχιτεκτονικής, των λειτουργιών κατάρτισης, των αλγορίθμων κατάρτισης και των παραμέτρων του δικτύου.
- 3) Η δοκιμή του νευρωνικού δικτύου: για να αξιολογηθεί το δίκτυο από την απόδοση εργασίας.
- 4) Η χρήση του νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη και την προσομοίωση.

Το μέγιστο πλεονέκτημα των νευρωνικών δικτύων είναι η δυνατότητα του να διαμορφώνει ένα σύνθετο μη γραμμικό πολυδιάστατο λειτουργικό. Το δίκτυο χτίζεται άμεσα από τα πειραματικά στοιχεία και από τις αυτό-οργανωτικές ιδιότητες της. Εντούτοις οι περιορισμοί της μεθόδου των νευρωνικών δικτύων είναι οι ακόλουθες:

- 1) Τα στοιχεία της βάσης δεδομένων πρέπει να έχουν μια σχέση με τις προβλεπόμενες παραμέτρους.
- 2) Τα ικανοποιητικά στοιχεία κατάρτισης για ένα σύνθετο νευρωνικό δίκτυο είναι απαραίτητα

3) Τα νευρωνικά δίκτυα είναι καθαρά φαινομενολογικά και δεν παράγουν μια μηχανιστική κατανόηση για τη διαδικασία της διαμόρφωσης. Εντούτοις ένα καλά φτιαγμένο νευρωνικό δίκτυο μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη μιας μηχανιστικής κατανόησης του εξεταζόμενου προβλήματος.

4.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Ένα σύνολο δεδομένων από αποτελέσματα μετρήσεων θα χωριστούν σε σύνολα δεδομένων κατάρτισης και σε σύνολα δεδομένων δοκιμής. Το σύνολο δεδομένων κατάρτισης χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τα βάρη όλων των συνδεόντων κόμβων έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο λάθους. Έκτοτε η απόδοση των δικτύων αξιολογείται με τη χρησιμοποίηση του συνόλου δεδομένων δοκιμής. Η ποιότητα της πρόβλεψης μπορεί κανονικά να χαρακτηριστεί από το μέσο τετραγωνικό λάθος (RMSE) των προβλεφθέντων τιμών από τα πραγματικά μετρημένα στοιχεία. Όσο μικρότερο το RMSE του συνόλου δεδομένων δοκιμής τόσο υψηλότερη είναι η μελλοντική ποιότητα. Σαν βελτίωση, ο συντελεστής του προσδιορισμού έχει εισαχθεί για να αξιολογήσει την ποιότητα των νευρωνικών δικτύων.

Για να αποφύγουμε οποιαδήποτε τεχνητή επιρροή στην επιλογή των στοιχείων δοκιμής, μια τυχαία τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί στην επιλογή, και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται ανεξάρτητα για πολλές φορές (πχ 50 φορές). Κατόπιν η διανομή των τιμών καταγράφεται και το ποσοστό $B \geq 0,9$ είναι υπολογισμένο, δεδομένου ότι αυτή η αξία προσδιορίζεται ως υψηλή μελλοντική ποιότητα. Λιγότερο από 15% του RMSE είναι μεταξύ των προβλεφθέντων μετρημένων τιμών. Είναι σαφές ότι όσο υψηλότερο το ποσοστό $B \geq 0,9$ είναι, είναι ότι καλύτερο για την ποιότητα.

4.4. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Δεδομένου ότι η διαμόρφωση των νευρωνικών δικτύων έχει μια μεγάλη επιρροή στην μελλοντική ποιότητα, είναι απαραίτητο να καθοριστεί ένας απλός κωδικός για να περιγράψει την διαμόρφωση των νευρωνικών δικτύων ως εξής.

$$N_{in} - [N_{n1} - N_{n2} - N_{n3}]_e - N_{out}$$

Όπου N_{in} και N_{out} είναι οι αριθμοί των στοιχείων εισαγωγής και παραγωγής αντίστοιχά το e είναι ο αριθμός των κρυμμένων στρώματων. N_{n1} , N_{n2} , N_{n3} είναι οι αριθμοί των νευρώνων σε κάθε κρυμμένο στρώμα αντίστοιχα. Για παράδειγμα ένα κρυμμένο στρώμα νευρωνικών δικτύων με επτά εισόδους και μια παράμετρο παραγωγής με το κρυμμένο στρώμα που περιλαμβάνει 21 στοιχεία (νευρώνες), δείχνει 9 εισόδους και μια παραγωγή νευρωνικού δικτύου με 15, 10 και 5 νευρώνες αντίστοιχα σε τρία κρυμμένα στρώματα.

4.5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΘΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΡΙΒΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ο Velten είναι μεταξύ των νεότερων πρωτοπόρων που ερεύνησαν τον τρόπο προσέγγισης στα σύνθετα πολυμερή υλικά χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα για να προβλέπουν την ένταση της τριβής σε μικρή ίνα. Ένα σύνολο δεδομένων από 72 ανεξάρτητες καταμετρήσεις τριβής χρησιμοποιούνται για εκπαίδευση και για έλεγχο των νευρωνικών

δικτύων. Το αρχείο προέρχεται από ελέγχους φθοράς με διάφορα σύνθετα υλικά κάτω από διαφορετικές καταστάσεις τριβής.

Δύο κατηγορίες μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των τριβολογικών δεδομένων:

- α) Εμπειρικά μοντέλα και
- β) Φαινομενολογικά μοντέλα.

Στα εμπειρικά μοντέλα υπάρχει ποσοτική σχέση μεταξύ τριβολογικών μεταβλητών. Στα φαινομενολογικά μοντέλα η ποσοτική σχέση, μεταξύ τριβολογικών μεταβλητών αναπτύσσονται από τη βασική εξίσωση των μηχανικών συνόλων. Τα φαινομενολογικά μοντέλα προτιμούνται από θεωρητικής άποψης διότι είναι δύσκολο να κάνεις πειραματικός μια ανάλυση της πρακτικής τριβολογίας. Επομένως τα εμπειρικά μοντέλα υπερέχουν έναντι της πειραματικής ανάλυσης της πρακτικής τριβολογίας μέχρι σήμερα.

Ο Velten όπως προαναφέραμε ερεύνησε το ενδεχόμενο προσέγγισης των σύνθετων υλικών χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, την τεχνική δηλαδή να προλέγουμε και να αναλύουμε την συμπεριφορά της τριβής σε μικρά ενισχυμένα πολυμερή υλικά. Με αυτή την διατύπωση τρία στρώματα νευρωνικών δικτύων με λειτουργία λογιστικού μετασχηματισμού μεταξύ του κρυφού και του παραγόμενου στρώματος που χρησιμοποιείται. Οι νευρωνικοί έλεγχοι απευθύνονται στα δείγματα. Το μέγεθος της απώλειας σαν μέτρο για την αναλογία της τριβής καθορίζεται από το βάρος και την μάζα του δείγματος πριν και μετά τον έλεγχο. Τα υλικά και οι εμπειρικές καταστάσεις χαρακτηρίζονται βάση των ακολούθων ποσοτήτων: πιεστική δύναμη, πιεστικός συντελεστής, συστολή αποτυχίας, δύναμη της έντασεως, ένταση αποτυχίας, δύναμη σύγκρουσης, περιβαλλοντολογικός έλεγχος θερμοκρασίας, αρχή φόρτωσης, μέσος όρος φόρτωσης και μέσος όρος ταχύτητας. Αυτοί οι παράμετροι χρησιμοποιούνται ως εισαγωγή στα νευρωνικά δίκτυα μέχρι η ένταση της καταμετρημένης τριβής να είναι η παραγωγή της ποσότητας.

Από ένα σχετικά μακρύ αριθμό από εισαγόμενες ποσότητες που χρησιμοποιούνται, ένα προμεθοδικό βήμα εφαρμόζεται ώστε να αναγνωρίσει και να μετακινήσει συσχετίσεις μεταξύ συνθετικών των εισαγόμενων διανυσμάτων. Οι επικρατέστερες προβλέψεις χρησιμοποιούν ένα αρχείο από 72 καταμετρήσεις της έντασης της τριβής (62 για εκπαίδευση και 10 για την εκτίμηση της εκτέλεσης του δικτύου), που βρέθηκαν ικανοποιητικές. Η ποιότητα της πρόβλεψης μπορεί να αποδείξει την αύξηση των διαθέσιμων αρχείων και από την εκμετάλλευση της κατασκευής του δικτύου με εκτίμηση της εκτέλεσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα μη σύνθετα υλικά απαιτούνται ευπρόσδεκτα αποτελέσματα, το μέγεθος του ελέγχου που ορίζεται προσδοκάται να είναι το μισό του μεγέθους από τα διαθέσιμα αρχεία.

Σε μια επακόλουθη εργασία ο Zhang απέδειξε την ποιότητα της πρόβλεψης από την προσθήκη πληροφοριών από σύνθετα υλικά σαν ένα κομμάτι από εισαγόμενα δεδομένα αυξανόμενα του μεγέθους των αρχείων και της εκμετάλλευσης της διαμόρφωσης των νευρωνικών δικτύων. Ένα σύνολο από 103 ανεξάρτητες καταμετρήσεις τριβής όπου βγαίνουν από ελέγχους από μικρή ενισχυμένη ίνα πολυαμιδίου, με ποικίλα συνθετικά υλικά από διαφορετικές καταστάσεις καταμετρούμενης τριβής που χρησιμοποιείται για εκπαίδευση και έλεγχο του δικτύου.

Τα σύνθετα υλικά έχουν μηχανικές ιδιότητες και ελεγχόμενων καταστάσεων χρησιμοποιούνται σαν εισαγόμενες παράμετροι και η χαρακτηριστική τριβή θα είναι τα δεδομένα εξόδου. Σ'αυτή την περίπτωση 88 αρχεία επιλέγονται τυχαία από τη βάση δεδομένων σαν αρχεία για εκπαίδευση και τα άλλα 15 χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των νευρωνικών δικτύων. Χρησιμοποιούμε το MATLAB για τα νευρωνικά δίκτυα στο κουτί εργαλείων με διάφορους αλγόριθμους εκπαίδευσης και η διαμόρφωση των νευρωνικών

δικτύων (ο αριθμός των στρωμάτων και ο αριθμός νεύρων στο στρώμα) αναλύεται και τα αποτελέσματα συγκρίνονται. Όταν ο αριθμός των δεδομένων μετατρέπεται από 88 σε 43 χρησιμοποιούμε τον ίδιο αλγόριθμο εκπαίδευσης και την ίδια διαμόρφωση των νευρωνικών δικτύων.

4.6. ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗ ΤΡΙΒΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Πρόσφατα ο Zhang εφάρμοσε ένα τρόπο για να προσεγγίσει την διαβρωτική τριβή για τρία πολυμερή υλικά, το πολυαιθυλένιο (PE), πολυουρεθάνιο (PUR), και την εποξική ρητίνη που τροποποιείται από υδροθερμική αποσύνθεση πολυουρεθάνης. Η γωνία αντίκτυπου για στερεά διαβρωτικά μόρια και μερικές χαρακτηριστικές ιδιότητες επιλέχθηκαν ως μεταβλητές εισαγωγής νευρωνικών δικτύων (ANN) για την πρόβλεψη του διαβρωτικού ποσοστού τριβής. Φαίνεται ότι η σπουδαιότητα των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων στο ποσοστό της διαβρωτικής τριβής θα μπορούσε να προσφέρει κάποιες πληροφορίες για το ποιες ιδιότητες έχουν μια ισχυρότερη σχέση με την τριβή των πολυμερών. Για παράδειγμα, για ένα πολυμερές σύστημα EP – PUR, το ποσοστό βάρους του PUR ποικίλει από 0,20,40,60,80%. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες περιλαμβάνουν την πυκνότητα, τη μοριακή μάζα μεταξύ των διαγωνίων συνδέσεων, της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας του γυαλιού (Tg), και της αρχικής θερμοκρασίας της διαγώνιας πυκνότητας συνδέσεως, και της ενέργειας του σπασίματος. Τέσσερις διαβρωτικές γωνίες, 30° , 45° , 60° και 90° χρησιμοποιήθηκαν, τέσσερις τύποι από διαφορετικά ποσοστά μαζικής ροής και οι ταχύτητες υιοθετήθηκαν. Επομένως ολόκληρο το σύνολο δεδομένων για το EP – EP – PUR περιέχει 80 ανεξάρτητες ομάδες στοιχείων, η διάρκεια δοκιμής ήταν 60(sec) για όλες τις μετρήσεις διάβρωσης.

Για να ερευνηθούν οι συσχετισμοί μεταξύ του διαβρωτικού ποσοστού τριβής και των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων αυτών των πολυμερών υλικών, κάθε χαρακτηριστική ιδιότητα χρησιμοποιήθηκε μόνο με τους απαραίτητους όρους διάβρωσης ως μεταβλητές εισαγωγής για την κατάρτιση των νευρωνικών δικτύων. Οι ιδιότητες αναλύθηκαν από το ποσοστό $B \geq 0,9$, που χρησιμοποιήθηκε για την σημασία των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων στη διαβρωτική τριβή. Είναι σαφές ότι το σύνθετο υλικό για παράδειγμα το εποχικό και το PUR παρουσιάζει ισχυρότερο συσχετισμό με την απόδοση της τριβής. Αυτό είναι σε συμφωνία με τα παρόμοια αποτελέσματα που βρήκε ο Zhang για την πρόβλεψη των νευρωνικών δικτύων στις τριβολογικές ιδιότητες μιας μικρής ίνας όπου ενίσχυσε τα πολυμερή υλικά. Η πυκνότητα έχει τη δεύτερη σημαντικότερη θέση λόγω της ισχυρής σχέσης στα σύνθετα. Δείχνει τη μοριακή μάζα μεταξύ του διαγωνίου εκθέματος συνδέσεων (Mc) και της ενέργειας του σπασίματος (Gc), μια παρόμοια ποιότητα που μπορεί να εξηγηθεί από την εξάρτηση του Gc στο $Mc^{1/2}$. Η συνδυασμένη επίδραση της πυκνότητας και το Mc μπορεί να μειώσουν την επιρροή του ελαστικού συντελεστή και της πυκνότητας συνδέσεων στην διαβρωτική συμπεριφορά της τριβής. Είναι ιδανικό η υλική σύνθεση και οι εξεταστικοί όροι να χρησιμεύουν ως δεδομένα εισόδου των νευρωνικών δικτύων.

4.6.1. ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Δύο πρόσθετες πληροφορίες μπορεί να είναι η περαιτέρω βοήθεια στην κατανόηση των προβλημάτων τριβής των υλικών χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα. α) Είναι οι τριβολογικές ιδιότητες του διαφορετικού ελέγχου εφοδιασμού με διάφορα ζευγάρια υλικών από τον Jones και β) προβλέπει την τριβή των πολυστρωμάτων.

4.7. ΖΩΗ ΚΟΥΡΑΣΗΣ

Η κούραση είναι ένα από τα πιο περίπλοκα προβλήματα για τα σύνθετα υλικά, και οι μηχανισμοί αποτυχίας δεν γίνονται ακόμα κατανοητοί. Οι εκτενείς δοκιμές πρέπει να πραγματοποιηθούν λόγω της απουσίας ενός καθορισμένου με σαφήνεια κριτηρίου αποτυχίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει την αποτυχία κούρασης στα σύνθετα υλικά. Τα νευρωνικά δίκτυα προσφέρουν την δυνατότητα να προβλέψουν την συμπεριφορά των σύνθετων χωρίς σύνδεση με τα μηχανιστικά επιχειρήματα. Επομένως έχουν εισαχθεί πρόσφατα για να προβλέψουν τη ζωή κούρασης.

4.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ήταν μια συνοπτική αναφορά στη χρήση νευρωνικών δικτύων στον τομέα των σύνθετων υλικών κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας. Αυτό το δείγμα της εργασίας που αναφέρεται, δείχνει ότι η χρήση των νευρωνικών δικτύων μπορεί να οδηγήσει σε τόσο ακριβείς προβλέψεις καλύτερες από αυτές που λαμβάνονται με τις συμβατικές μεθόδους. Βελτιώνοντας τις μελλοντικές ικανότητες αυτών των δικτύων με την ανάπτυξη παραδείγματος χάριν, των μεθόδων με την κατάλληλη αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων, ο αριθμός κρυμμένων στρωμάτων και ο αριθμός νευρώνων σε κάθε κρυμμένο στρώμα είναι ακόμα θέματα για την περαιτέρω έρευνα. Ένα άλλο ερευνητικό θέμα που είναι άλυτο είναι η δυνατότητα να προβλεφθεί η μηχανική συμπεριφορά ενός τύπου σύνθετου υλικού μόλις είναι γνωστό το πειραματικό στοιχείο για άλλο είδους υλικού. Μια μεγάλη επιτυχία των νευρωνικών δικτύων θα ήταν η δυνατότητα να προβλεφθεί η μηχανική συμπεριφορά ενός φύλλου πλαστικού όταν είναι γνωστή η συμπεριφορά ενός ενιαίου ελάσματος. Η ανάπτυξη των κατάλληλων κανόνων που χρησιμοποιούνται για τις διαφορετικές εφαρμογές καθώς επίσης και τις κατάλληλες λειτουργίες που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση είναι ακόμα ερευνητικοί τομείς για το μέλλον.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ	3
2.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ	3
2.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ	3
2.2.1 Ενισχυτικές ίνες (reinforcing fibers)	3
1. ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (glass fiber)	3
2. ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (carbon fibers)	5
3. ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (polymer fibers)	7
5. ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ	9
6. ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ (ceramic fibers)	10
7. ΤΡΙΧΙΤΕΣ (whiskers)	10
2. 2. Μήτρες (matrix)	11
1. ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ	11
2. ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ	12
3. ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ	12
2. 2. 3. Επιλογή ενισχυτικών ινών και μήτρας	12
1. Γεωμετρία ινών	12
2. Ποσοστό ινών	13
3. Προσανατολισμός ινών	15
4. Ιδιότητες ινών	16
5. Συνάφεια ινών-μήτρας	17
6. Επιλογή υλικών	18
2.3. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ	21
2. 3. 1. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ	22
(α) Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτων	22
(β) Συνεχής μορφοποίηση συνθέτων	23
2. 3. 2. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας	24
(α) Συν-διέλαση (co-extrusion)	25
(β) Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)	25
(γ) Συμπίεση σε στερεή κατάσταση	25
(δ) Απόθεση υλικού μήτρας	26
2. 3. 3. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας	26
3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	26
3. 1. ΓΕΝΙΚΑ	26
3.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	27
3.3. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	29
4. ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (Laminar composites)	30
4. 1. ΓΕΝΙΚΑ	30
4. 2. ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ (coated materials)	30
4.3. ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (bimetallics)	32
4.4. ΠΟΛΥΚΑ ΚΑΙ SANDWICH ΥΛΙΚΑ (multilayers and sandwich materials)	33
5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	34
5.1. Αυτοκινητοβιομηχανία	34
5.2. Σωληνώσεις	35
5.3. Πυροπροστασία	35
5.4. Εφαρμογές στην Οικοδομική	35
5.5. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ	36
5.5.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο
ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.1. Ο νευρώνας.....	40
2.2 Νευρωνικά δίκτυα.....	46
2.2.1 ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ.....	48
2.2.2 Νευρ. δίκτυα με θετική ανατροφοδότηση και συναπτική ενεργοποίηση.....	48
2.3 ΟΡΙΣΜΟΙ.....	49
2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΝΔ.....	50
2.5 ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΩΝ ΤΝΔ.....	51
2.6 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΓΕΝΙΚΕΥΣΗΣ.....	53
2.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΤΝΔ.....	53
2.8 ΔΗΜΟΦΙΛΗ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΝΔ.....	54
2.8.1 Perceptron.....	54
2.8.2 Adaline (Adaptive linear neurone).....	56
2.8.3 Brain state in a box (BSB).....	58
2.9 Συστήματα ασφαλείας.....	60
2.10 Ταξινόμηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	61
2.11 Η Διεργασία μάθησης στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	62
2.12 Ορίζοντας το χώρο των βαρών.....	63
2.13 Προσαρμοστικότητα και εκμάθηση.....	64
2.14 Η ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΜΕ ΕΠΙΒΛΕΨΗ ΩΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	66
2.15 Επισκόπηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την εκπαίδευση ΤΝΔ.....	67
2.16 Εφαρμογές των ΤΝΔ.....	69
2.17 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΤΝΔ.....	70
2.17.1 ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	71
2.17.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	73
2.17.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΜΠΟΤ.....	74
2.18 Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.....	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο
ΤΡΙΒΗ - ΦΘΟΡΑ

3.1. ΤΡΙΒΗ.....	82
3.2. ΦΘΟΡΑ.....	82
1. ΦΘΟΡΑ ΚΟΠΩΣΗΣ.....	84
2. ΦΘΟΡΑ ΛΕΙΑΝΣΗΣ.....	84
3. ΦΘΟΡΑ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ.....	85
4. ΦΘΟΡΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	85
5. ΦΘΟΡΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	86
3.2.1. ΕΡΠΥΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	87
3.3. ΤΡΙΒΗ- ΦΘΟΡΑ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	87
3.4. ΦΘΟΡΑ - ΤΡΙΒΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	88
3.5. ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ.....	88
3.5.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ.....	89
3.6. ΕΙΔΗ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ.....	91
3.6.1. ΑΕΡΙΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ.....	91
3.6.2 ΥΓΡΑ ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ.....	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ
ΦΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΡΙΒΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	94
4.2 ΕΦΑΡΜ. ΝΕΥΡ. ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	94
4.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	95
4.4. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	95
4.5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	
ΦΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΡΙΒΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	96
4.6. ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗ ΤΡΙΒΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	97
4.6.1. ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	98
4.7. ΖΩΗ ΚΟΥΡΑΣΗΣ.....	98
4.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	102

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ
ΔΗΜΗΤΡΗΣ Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ (ΑΘΗΝΑ 1996).
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π
ΑΘΗΝΑ 1996
 2. COMPOSITE MATERIALS <<DESIGN AND APPLICATION>>
DANIEL GAY, SUDNG V. HOY, STEPHEN W. TSAI
Copyright 2003 by CRC PRESS LLC
 3. ΣΥΜΜΕΙΚΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ
ΘΑΝΑΣΗΣ Χ. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ (12 ΕΚΔΟΣΗ – 1995)
 4. PRINCIPLES OF COMPOSITE MATERIAL MECHANICS
RONALD F. GIBSON
Department of Mechanical Engineering Wayne state university Detroit, Michigan.
Copyright 1994 by Mc Graw - Hill
 5. ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ
ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ Ν.ΤΣΑΝΤΟΥ
 6. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΓΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΣ
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΓΕΩΡΓΙΟΥ – ΠΕΤΡΟΥ Κ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ
Φεβρουάριος 1996
 7. ΝΕΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΓΕΩΡΓΙΟΥ Δ. ΜΑΓΟΥΛΑ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ.
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΑΤΡΑ 1998
 8. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΡΙΖΟΣ
Δρ. ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ
ΑΘΗΝΑ
- ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ
1. WEAR VOLUME PREDICTION WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS
K. VELTON, R. REINICKE, K. FRIDRICH
 2. ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS APPLIED TO POLYMER COMPOSITES
Z. ZHANG, K. FRIEDRICH
- ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ
1. WWW. Sciencedirect.com
 2. WWW. Heal_link.gr