



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
ΔΠΜΣ «Συστήματα Αυτοματισμού»
Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατεργασιών

**Σχεδιασμός κατεργασίας συγκόλλησης με τριβή με χρήση
νευρωνικών δικτύων**

Γαλανός Παντελεήμων
A.M.: 021-221-04

Επιβλέπων: Γ. Χ. Βοσνιάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2022

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract.....	v
Κατάλογος Εικόνων.....	vi
Κατάλογος Πινάκων.....	ix
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Δομή της εργασίας.....	1
1.2 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας.....	1
1.3 Η αρχή λειτουργίας.....	2
Κεφάλαιο 2: Περιστροφική συγκόλληση με τριβή (Rotary Friction Welding).....	5
2.1 Συνεχής Συγκόλληση με τριβή (Continuous Friction Welding).....	6
2.2 Αδρανειακή Συγκόλληση με τριβή (Inertia Friction Welding).....	6
2.3 Περιγραφή της διαδικασίας.....	7
2.4 Παράμετροι κατεργασίας.....	8
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή της μηχανής.....	10
Κεφάλαιο 4: Βιβλιογραφική ανασκόπηση συγκόλλησης υλικών με τριβή.....	12
4.1 Μελέτη συγκολλήσεων Αλουμινίου.....	12
4.2 Μελέτη συγκόλλησης Χαλύβων/Σιδήρου.....	14
4.3 Μελέτη συγκολλήσεων μεταξύ Χαλύβων και Αλουμινίου.....	15
4.4 Μελέτη συγκολλήσεων μεταξύ Χαλύβων με άλλα υλικά.....	16
4.5 Μελέτη συγκολλήσεων μεταξύ διαφόρων υλικών.....	17
Κεφάλαιο 5: Εισαγωγή στα νευρωνικά δίκτυα.....	19
5.1 Η σχεδίαση των νευρωνικών δικτύων.....	19
5.2 Η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων.....	20
Κεφάλαιο 6: Ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων.....	23

6.1 Εισαγωγή στην ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων με regression	24
6.2 Περιγραφή της φιλοσοφίας και της λειτουργία των νευρωνικών δικτύων...	26
6.3 Ανάπτυξη κώδικα εκπαίδευσης στο MATLAB	27
Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	31
7.1 Αποτελέσματα για πίεση τριβής F_p	31
7.2 Αποτελέσματα για πίεση σφυρηλάτησης U_p	37
7.3 Αποτελέσματα για τον χρόνο τριβής	42
7.4 Αποτελέσματα για τον χρόνο σφυρηλάτησης	47
7.5 Αποτελέσματα για ταχύτητα περιστροφής rpm.....	51
Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	56
Βιβλιογραφία.....	58

Ευχαριστίες

Πρώτο από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας μου κ. Γιώργο-Χ. Βοσνιάκο, ο οποίος από την πρώτη κιόλας στιγμή έδειξε εμπιστοσύνη στο πρόσωπο μου. Η στήριξη του, η ελπίδα στις δυσκολίες, οι συμβουλές του και οι παρατηρήσεις του με βοήθησαν σημαντικά ώστε να μπορέσω να βρω την λύση εκείνη που έψαχνα κάθε φορά. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Πανώριο Μπενάρδο ο οποίος με προσωπικό χρόνο και κόπο, πολλή υπομονή και προθυμία με βοήθησε να ξεπεράσω δυσκολίες και να βρω απαντήσεις στο κομμάτι του λογισμικού και της ανάπτυξης του κώδικα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Marek Chodnicki καθώς και όλο το προσωπικό του εργαστηρίου για την άψογη συνεργασία τους.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την αυτοματοποίηση στην εξαγωγή παραμέτρων για την συγκόλληση διαφορετικών ή και ίδιων υλικών με friction welding. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν 5 νευρωνικά δίκτυα, ένα για κάθε μια από τις πέντε παραμέτρους κατεργασίας που σχετίζονται με την συγκόλληση με τριβή, οι οποίες είναι η πίεση και ο χρόνος σφυρηλάτησης, η πίεση και ο χρόνος τριβής καθώς και ο αριθμός περιστροφών ανά λεπτό του chuck της μηχανής. Τα δίκτυα αυτά εκπαιδεύτηκαν κατάλληλα ώστε να αποδίδουν τις όσο το δυνατόν καλύτερες και πιο αποδεκτές παραμέτρους κατεργασίας μέσα από δεδομένα που συλλέχθηκαν από την διεθνή βιβλιογραφία και σχετίζονταν με τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των υλικών. Οι ιδιότητες αυτές ήταν το μέτρο ελαστικότητας (GPa), το όριο διαρροής (MPa), η σκληρότητα (Vickers), η θερμική αγωγιμότητα [W/(mK)], η θερμοχωρητικότητα (J/g·K) και ο συντελεστής θερμικής διαστολής [(°C)⁻¹] για κάθε ένα από τα υλικά. Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας θα επιτυγχάνεται από το γεγονός ότι ο χρήστης θα δίνει ως δεδομένα τις ιδιότητες αυτές, με την μορφή διανύσματος στήλης 12 θέσεων και τα δίκτυα θα του επιστρέφουν ως αποτέλεσμα τις 5 παραμέτρους της κατεργασίας.

Για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων επιλέχθηκε η γραμμική παλινδρόμηση ενώ ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε ήταν ο Levenberg-Marquardt (LM). Η ανάπτυξη τους έγινε στο περιβάλλον της MATLAB μέσω της ανάπτυξης κατάλληλου κώδικα ενώ μετά από πολλές δοκιμές και αρχιτεκτονικές επίλεχθηκε να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα κρυφό επίπεδο με τον αριθμό των νευρώνων να κυμαίνονται μεταξύ τεσσάρων με επτά, λόγω της απλότητας του προβλήματος που μελετήθηκε.

Abstract

This thesis deals with automation in the extraction of parameters for the welding of different or even the same materials with friction welding. For this reason, 5 neural networks were developed, one for each of the five machining parameters related to friction welding, which are forging pressure and time, friction pressure and time, and the number of revolutions per minute of chuck of the machine. These networks were properly trained to perform the best machining parameters, through data collected from the international literature and related to the mechanical and thermal properties of the materials. The conditions were modulus of elasticity (GPa), yield strength (MPa), hardness (Vickers), thermal conductivity [W/(mK)], heat capacity (J/g · K) and coefficient of thermal expansion [(°C)⁻¹] for each of the materials.

For the training of the neural networks, linear regression was chosen while the algorithm applied was Levenberg-Marquardt (LM). Their development was done in the MATLAB environment through the development of relative code, while after many tests and architectures it was chosen to use only one hidden layer with the number of neurons varying between four and seven, due to the simplicity of the studied problem.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Τα 4 βασικά στάδια της συγκόλλησης με τριβή.....	3
Εικόνα 2. Τα στάδια συγκόλλησης υλικών για τις μεθόδους Continuous Friction Welding και Inertia Friction Welding.....	7
Εικόνα 3. Παράμετροι κατεργασίας και φάσεις σε σχηματική απεικόνιση συναρτήσεως του χρόνου.....	9
Εικόνα 4. Διάταξη και μέρη μιας τυπικής μηχανής CFW με υδραυλικό σύστημα προώθησης του chuck.....	10
Εικόνα 5. Ομπρέλα επιλεγμένων τεχνικών της επιστήμης δεδομένων. Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) εμπίπτει στη σφαίρα της επιστήμης δεδομένων και περιλαμβάνει τον κλασικό προγραμματισμό και τη μηχανική μάθηση (ML). Η ML περιέχει πολλά μοντέλα και μεθόδους, όπως η βαθιά μάθηση (DL) και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN).....	19
Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής ενός τυπικού νευρωνικού δικτύου..	20
Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση τη δομής ενός νευρωνικού δικτύου της κατηγορίας regression.....	24
Εικόνα 8. Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εκπαίδευσης (training), της επικύρωσης (validation) και της δοκιμής (test).....	25
Εικόνα 9. Δεδομένα εισαγωγής με την μορφή διανύσματος 12X1.....	26
Εικόνα 10. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πίεση τριβής χωρίς την ακτίνα.....	32
Εικόνα 11. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για την πίεση τριβής.....	32
Εικόνα 12. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την πίεση τριβής χωρίς την ακτίνα.....	33
Εικόνα 13. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για την πίεση τριβής.....	33
Εικόνα 14. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πίεση τριβής με την προθήκη της ακτίνας.....	35
Εικόνα 15. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για την πίεση τριβής.....	35
Εικόνα 16. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την πίεση τριβής με την προσθήκη της ακτίνας.....	36

Εικόνα 17. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για την πίεση τριβής.....	36
Εικόνα 18. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πίεση σφυρηλάτησης χωρίς την ακτίνα.....	38
Εικόνα 19. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για την πίεση σφυρηλάτησης.....	38
Εικόνα 20. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την πίεση σφυρηλάτησης χωρίς την ακτίνα.....	39
Εικόνα 21. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για την πίεση σφυρηλάτησης.....	39
Εικόνα 22. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πίεση σφυρηλάτησης με την προθήκη της ακτίνας.....	40
Εικόνα 23. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για την πίεση σφυρηλάτησης.....	40
Εικόνα 24. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την πίεση σφυρηλάτησης με την προσθήκη της ακτίνας.....	41
Εικόνα 25. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για την πίεση σφυρηλάτησης.....	41
Εικόνα 26. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο τριβής χωρίς την ακτίνα.....	42
Εικόνα 27. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για τον χρόνο τριβής.....	43
Εικόνα 28. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο τριβής χωρίς την ακτίνα.....	43
Εικόνα 29. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για τον χρόνο τριβής.....	44
Εικόνα 30. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο τριβής με την προθήκη της ακτίνας.....	45
Εικόνα 31. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για τον χρόνο τριβής.....	45
Εικόνα 32. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο τριβής με την προσθήκη της ακτίνας.....	46
Εικόνα 33. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για τον χρόνο τριβής.....	46

Εικόνα 34. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο σφυρηλάτησης χωρίς την ακτίνα.....	47
Εικόνα 35. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για τον χρόνο σφυρηλάτησης.....	48
Εικόνα 36. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο σφυρηλάτησης χωρίς την ακτίνα.....	48
Εικόνα 37. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για τον χρόνο σφυρηλάτησης.....	49
Εικόνα 38. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο σφυρηλάτησης με την προθήκη της ακτίνας.....	49
Εικόνα 39. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για τον χρόνο σφυρηλάτησης.....	50
Εικόνα 40. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο σφυρηλασίας με την προσθήκη της ακτίνας.....	50
Εικόνα 41. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για τον χρόνο σφυρηλασίας.....	51
Εικόνα 42. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την ταχύτητα περιστροφής χωρίς την ακτίνα.....	52
Εικόνα 43. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για την ταχύτητα περιστροφής.....	52
Εικόνα 44. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την ταχύτητα περιστροφής χωρίς την ακτίνα.....	53
Εικόνα 45. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για την ταχύτητα περιστροφής.....	53
Εικόνα 46. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την ταχύτητα περιστροφής με την προθήκη της ακτίνας.....	54
Εικόνα 47. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για την ταχύτητα περιστροφής.....	54
Εικόνα 48. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την ταχύτητα περιστροφής με την προσθήκη της ακτίνας.....	55
Εικόνα 49. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για την ταχύτητα περιστροφής.....	55

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση με βασικό υλικό του Αλουμίνιο.....	13
Πίνακας 2. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση μεταξύ χαλύβων.....	14
Πίνακας 3. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση μεταξύ χαλύβων και αλουμινίου.....	16
Πίνακας 4. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση μεταξύ χαλύβων και άλλων υλικών...	17
Πίνακας 5. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση μεταξύ διαφόρων υλικών.....	18
Πίνακας 6. Ο αριθμός νευρώνων και επαναλήψεων που επιλέχθηκε για κάθε δίκτυο.....	31

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η έννοια της συγκόλληση με υλικών με τήξη είναι γνωστή ήδη από την αρχαιότητα. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές μέσω των οποίων επιτεύχθηκαν συγκολλήσεις πολλών και διαφορετικών υλικών. Ορισμένες από αυτές έχουν ως βάση την τήξη ενός τρίτου υλικού, συνήθως ηλεκτρόδιο, ενώ άλλες την απευθείας τήξη των προς συγκόλληση υλικών. Η ανάγκη όμως για την επίλυση ορισμένων προβλημάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη μιας νέας καινοτόμου μεθόδου κατά τις αρχές της δεκαετίας του '90 από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων. Η συγκόλληση στερεάς κατάστασης με τριβή (Friction Welding: FRW) εφευρέθηκε από τους Wayne Thomas και E. Nickolas το 1991. Έκτοτε και μέχρι σήμερα η συγκεκριμένη τεχνική έχει φέρει επανάσταση στην βιομηχανία [1].

1.1 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη. Στα τρία πρώτα κεφάλαια λαμβάνει χώρα μια εισαγωγή στην κατεργασία τον τρόπο λειτουργίας της καθώς και άλλες λεπτομέρειες απαραίτητες για την κατανόηση του όλου εγχειρήματος.

Στην συνέχεια, θα ακολουθήσει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις παραμέτρους κατεργασίας για συγκόλληση πολλών και διαφορετικών υλικών μεταξύ τους με την τεχνική της περιστροφικής συγκόλλησης με τριβή.

Έπειτα, θα γίνει εισαγωγή στην ιδέα των νευρωνικών δικτύων καθώς επίσης περιγραφή και παρουσίαση όλων όσων έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια της εργασίας. Στο τέλος της εργασίας ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, η συζήτηση αλλά και τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν μέσα από την ενασχόληση με το αντικείμενο.

1.2 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει την βιβλιογραφική ανασκόπηση και την μελέτη της συγκόλλησης υλικών με τριβή, καθώς και την ανάπτυξη κατάλληλων νευρωνικών δικτύων (neural networks) για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας εξαγωγής παραμέτρων ανάλογα με τα προς συγκόλληση υλικά.

Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναζήτηση των περισσότερο αποδεκτών παραμέτρων κατεργασίας μέσα από την παγκόσμια βιβλιογραφία, σχετικά με την συγκόλληση διαφορετικών υλικών με την τεχνική της περιστροφικής συγκόλλησης με τριβή, οι οποίες θα αποτελέσουν τα δεδομένα εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων. Στη συνέχεια, τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί και μετά από κατάλληλη διαχείριση και ταξινόμηση τους, θα χρησιμοποιηθούν για την οργάνωση, τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη διαφορετικών νευρωνικών δικτύων.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η αυτοματοποίηση της διαδικασίας εξαγωγής παραμέτρων συγκόλλησης για διαφορετικές κατηγορίες υλικών και για συγκολλήσεις ανόμοιων μεταξύ τους υλικών, αλλά και ο εμπλουτισμός της ήδη υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Παράλληλα, το κίνητρο της εργασίας αυτής, που υποδεικνύει και την πρωτοτυπία της, είναι η απουσία παρόμοιου συστήματος αυτόματης ταξινόμησης συγκολλήσεων από την παγκόσμια βιβλιογραφία, καθώς και η έλλειψη συγκεντρωτικού καταλόγου ευρείας κλίμακας σχετικά με τις παραμέτρους της κατεργασίας για διαφορετικά υλικά.

1.3 Η αρχή λειτουργίας

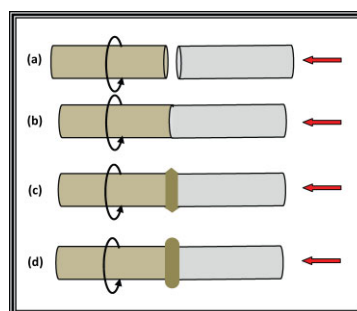
Οι παραδοσιακές τεχνικές συγκόλλησης απαιτούν παραγωγή θερμότητας για την τήξη και τη συγκόλληση των υλικών, που συνήθως προερχόταν από εξωτερικά μέσα όπως αέρια, ηλεκτρικό ρεύμα ή χημικά. Η FRW αποτελεί μια διαδικασία συγκόλλησης στερεάς κατάστασης που δεν περιλαμβάνει τήξη των μεταλλικών επιφανειών στη ραφή. Έχει βρεθεί ότι εξαλείφει τα ελαττώματα που παρουσιάζουν οι παραδοσιακές διεργασίες συγκόλλησης, όπως ρωγμές, πορώδες, εγκλείσματα σκωρίας και έλλειψη τηγμένου υλικού [2].

Η συγκόλληση με τριβή είναι μια διαδικασία στερεάς κατάστασης, όπου δεν χρησιμοποιείται ηλεκτρική ή άλλη πηγή ενέργειας, αντ' αυτού, χρησιμοποιείται θερμομηχανική ενέργεια που παράγεται από την τριβή στη διεπαφή των προς συγκόλληση εξαρτημάτων. Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, οι επιφάνειες είναι υπό πίεση και αυτή η περίοδος που ονομάζεται φάση θέρμανσης συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η θερμοκρασία όπου το υλικό μαλακώνει. Η θερμοκρασία στην περιοχή συγκόλλησης για χάλυβες είναι μεταξύ 900 και 1300 °C. Το θερμαινόμενο μέταλλο στη διεπιφάνεια συσσωρεύεται αυξάνοντας την πίεση μετά τη φάση θέρμανσης. Μέταλλα και κράματα, τα οποία δεν μπορούν να συγκολληθούν με άλλες μεθόδους συγκόλλησης, μπορούν να συγκολληθούν με συγκόλληση

με τριβή, αποτελώντας λύση σε πολλά προβλήματα. Για να επιτευχθεί καλή συγκόλληση μεταξύ των εξαρτημάτων, πρέπει οι μη επεξεργασμένες επιφάνειες να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους. Η συγκόλληση με αυτή την τεχνική είναι αποτελεσματική επειδή η τριβή διορθώνει τις ατέλειες στην διεπαφή. Αν και δεν υπάρχει το φαινόμενο της τήξης, υπάρχει πιθανότητα να μια μικρή ποσότητα υλικού να τακεί. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι ορατό καθώς η συσσωρευμένη ποσότητα υλικού που προκύπτει περιμετρικά της ένωσης δεν επιτρέπει να φανεί [3].

Πιο συγκεκριμένα, η ένωση επιτυγχάνεται μέσα από μια διαδικασία, όπου τα υλικά μαλακώνουν κατάλληλα ώστε με επιβολή πίεσης να σχηματίσουν μηχανικούς δεσμούς μεταξύ τους, μέσω πλαστικής παραμόρφωσης. Η ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας ώστε να μαλακώσουν τα υλικά, εξασφαλίζεται μέσα από την σχετική τριβή του ενός με το άλλο με σχετικά υψηλό ρυθμό. Παραδοσιακά, η FW πραγματοποιείται κινώντας το ένα εξάρτημα σε σχέση με το άλλο κατά μήκος ενός άξονα, ενώ όταν έρθουν σε επαφή εφαρμόζεται θλιπτική τάση για την επίτευξη της ένωσης σε συνδυασμό με περιστροφική ή παλινδρομική κίνηση. Η θέρμανση που δημιουργείται στη διεπιφάνεια λόγω τριβής, μαλακώνει και τα δύο εξαρτήματα, τα οποία εν συνεχεία πιέζονται το ένα στο άλλο με το μαλακότερο υλικό να ωθείται προς τα έξω και περιμετρικά της ένωσης, με αποτέλεσμα η τελική ένωση να αποτελείται από καθαρό υλικό. Στη συνέχεια, η σχετική κίνηση διακόπτεται και μερικές φορές εφαρμόζεται επιπλέον πίεση προτού αφηθεί η συγκόλληση να κρυώσει. Η ειδικότερη διαφορά της FW είναι ότι τα υλικά δεν τήκονται και η συγκόλληση που σχηματίζεται είναι σε στερεή κατάσταση [4].

Η διαδικασία χωρίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια. Αυτά είναι τα ακόλουθα: προσέγγιση των υλικών αξονικά, περιστροφή και τριβή, παυση σχετικής περιστροφής και συμπίεση των υλικών, ψύξη συγκόλλησης. Τα στάδια αυτά φαίνονται και στην **Εικόνα 1** που ακολουθεί.



Εικόνα 1. Τα 4 βασικά στάδια της συγκόλλησης με τριβή [4].

Οι βασικές κατηγορίες Friction Welding είναι τέσσερις, η περιστροφική, η γραμμική, η τροχιακή και συγκόλληση με τριβή και ανάδευση (Friction Stir Welding). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η συνεχής και η αδρανειακή συγκόλληση (continuous drive και inertia drive αντίστοιχα), στην δεύτερη απουσιάζει η έννοια της περιστροφής, η τρίτη προορίζεται για συγκόλληση μη κυκλικών διατομών και τέλος η τέταρτη εφαρμόζεται για συγκόλληση άκρων λεπτών φύλλων.

Στην περιστροφική συγκόλληση, η οποία χρησιμοποιείται ήδη από τη δεκαετία του 1940, το ένα εξάρτημα περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του ενώ το άλλο παραμένει ακίνητο. Για τη συγκόλληση, τα δύο εξαρτήματα ενώνονται υπό την εφαρμογή πίεσης. Στη γραμμική συγκόλληση, η οποία χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 1980, τα μέρη κινούνται υπό πίεση μεταξύ τους με παλινδρομικό τρόπο, παράλληλα στην επιφάνεια της ένωσης. Η τροχιακή συγκόλληση, η οποία είναι ένας συνδυασμός γραμμικής και περιστροφικής, εισήχθη στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Σε αυτή τη διαδικασία, το κέντρο μιας συνιστώσας σε σχέση με την άλλη συνιστώσα μετακινείται γύρω από μια δισδιάστατη καμπύλη, π.χ. έναν κύκλο, για να παρέχει τη δράση της τριβής. Τα δύο μέρη που πρόκειται να ενωθούν περιστρέφονται γύρω από τους διαμήκεις άξονές τους με τον ίδιο τρόπο και με την ίδια σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Τέλος, στην συγκόλληση με τριβή και ανάδευση, η ενέργεια παρέχεται μέσα από την τριβή του περιουχενίου του εργαλείου με τα δύο προς συγκόλληση υλικά, υπό μορφή φύλλων, ενώ παράλληλα τα μαλακωμένα υλικά αναδεύονται μεταξύ τους. Στην συγκεκριμένη μέθοδο δεν γίνεται λόγος για επιφάνεια διατομής αλλά για περιοχή συγκόλλησης η οποία χωρίζεται σε επιπλέον υποπεριοχές [5] [6] [7].

Κεφάλαιο 2: Περιστροφική συγκόλληση με τριβή (Rotary Friction Welding)

Οι ιδέα για χρήση της θερμότητας που παράγεται από την τριβή, στη συγκόλληση και τη διαμόρφωση υλικών δεν είναι καινούρια. Η συγκόλληση με τριβή αποτελεί πλέον μια εμπορική διαδικασία, η οποία έχει βρει πολλές εφαρμογές σε διάφορα μέρη του κόσμου με την πρόοδο της τεχνολογίας. Η πρώτη δοκιμή της συγκόλλησης με τριβή χρονολογείται από τον 15ο αιώνα και το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας χορηγήθηκε στον J.H. Bevington, ο οποίος τότε ήταν μηχανικός. Ο Bevington εφάρμοσε για πρώτη φορά συγκόλληση με τριβή σε εξάρτηση μεταλλικών σωλήνων. Η συγκόλληση με τριβή που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε εργαλεία κοπής στη βιομηχανία επεξεργασίας μετάλλων έχει βρει αρκετές εφαρμογές. Ο W. Richter κατοχύρωσε τη διαδικασία συγκόλλησης με τριβή το 1924 (στην Αγγλία) και το 1929 (στη Γερμανία) και ο H. Klopstock κατοχύρωσε την ίδια διαδικασία στην ΕΣΣΔ (1924). Οι πρώτες μελέτες συγκόλλησης με τριβή πραγματοποιήθηκαν από το Welding Institute το 1961. Τροποποιώντας τη συγκόλληση με τριβή, η Caterpillar Tractor Co. στις ΗΠΑ ανέπτυξε τη μέθοδο της αδρανειακής συγκόλλησης το 1962. Μετά από αυτή τη μελέτη, η συμβατική συγκόλληση με τριβή έχει θεωρηθεί ως διαδικασία ρωσικού τύπου και η συγκόλληση αδράνειας ως διαδικασία τύπου Caterpillar. Με αυτές τις εξελίξεις, οι εφαρμογές της συγκόλλησης με τριβή έχουν βρει πολλές εφαρμογές σε όλο τον κόσμο. Η συγκόλληση με τριβή είναι μια από τις πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους συγκόλλησης στη βιομηχανία μετά τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων [3].

Η συγκόλληση με τριβής αποτελεί μια ιδιαίτερη μεταλλουργική διαδικασία, και περιγράφεται από μια σειρά φυσικών φαινομένων που περιλαμβάνουν την παραγωγή θερμότητας (λόγω τριβής), την πλαστική παραμόρφωση των προς συγκόλληση υλικών στο σημείο επαφής τους, αλλά και την αλλαγή της φάσης στερεάς κατάστασης (solid-state phase variation). Η συγκεκριμένη κατεργασία ανήκει στην κατηγορία των συγκολλήσεων στερεάς κατάστασης (solid-state welding) καθώς κατά την συγκόλληση δημιουργούνται μεταλλικοί δεσμοί, σε θερμοκρασία χαμηλότερη από το σημείο τήξης των δύο μετάλλων, χωρίς την χρήση επιπλέον υλικού συγκόλλησης, συνήθως με την εφαρμογή πίεσης. Η θερμότητα για να μαλακώσουν τα υλικά, εξασφαλίζεται από την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα. Οι δύο υποκατηγορίες της περιστροφικής συγκόλλησης, οι οποίες και θα αναλυθούν στην συνέχεια, είναι η συνεχής συγκόλληση με τριβή (Continuous Friction Welding) και η αδρανειακή συγκόλληση με τριβής (Inertia Friction Welding) [8].

2.1 Συνεχής Συγκόλληση με τριβή (Continuous Friction Welding)

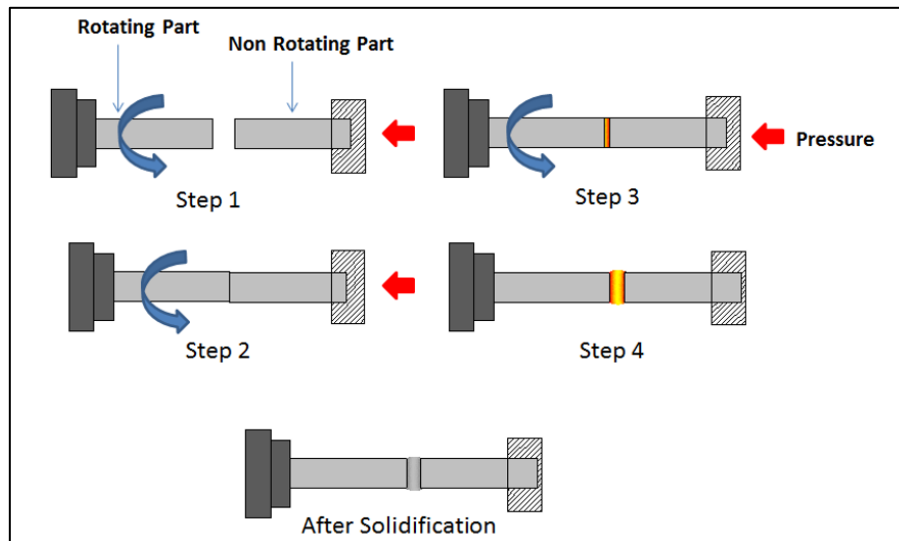
Η συγκόλληση με συνεχή τριβή μετάδοσης κίνησης (CFW) είναι μια διαδικασία σύνδεσης στερεάς κατάστασης, στην οποία ένα από τα προς συγκόλληση εξαρτήματα διατηρείται ακίνητο, ενώ το άλλο περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό και στη συνέχεια τα δύο μέρη ωθούνται το ένα πάνω στο άλλο με μια αξονική δύναμη. Όταν επιτευχθεί επαρκής θερμοκρασία στις επιφάνειες τριβής, το περιστρεφόμενο εξάρτημα σταματά γρήγορα με την χρήση φρένου στον κινητήρα και η αξονική δύναμη διατηρείται στην ίδια τιμή ή αυξάνεται για μικρό χρονικό διάστημα. Σε αυτό το στάδιο σφυρηλάτησης το θερμό μέταλλο ψύχεται υπό πίεση και η συγκόλληση στερεοποιείται. Κατά τη διάρκεια του CFW, η εξέλιξη της θερμοκρασίας και η πλαστική παραμόρφωση της ραφής είναι οι κυρίαρχες διεργασίες, οι οποίες καθορίζουν την απομάκρυνση των ρύπων όπως τα υπολείμματα οξειδίου από την περιοχή συγκόλλησης και επομένως ελέγχουν την ποιότητα της [9]

2.2 Αδρανειακή Συγκόλληση με τριβή (Inertia Friction Welding)

Στην αδρανειακή συγκόλληση με τριβή, η απαιτούμενη ενέργεια για την ένωση των εξαρτημάτων λαμβάνεται από την αποθηκευμένη ενέργεια του σφονδύλου. Πιο συγκεκριμένα, το ένα εξάρτημα διατηρείται ακίνητο ενώ το άλλο είναι προσαρτημένο στον περιστρεφόμενο σφόνδυλο (Chuck). Μόλις τα δύο υλικά έρθουν σε επαφή, η ενέργεια του σφονδύλου μετατρέπεται σε θερμότητα τριβής που χρησιμοποιείται για συγκόλληση τους. Κατά την επαφή, η ταχύτητα του σφονδύλου μειώνεται με ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας καθ' όλη την διάρκεια αυτής της περιόδου, ενώ παράλληλα η ασκούμενη αξονική δύναμη αυξάνεται. Η διαδικασία ολοκληρώνεται, μόλις ο σφόνδυλος ακινητοποιηθεί πλήρως. Η αδρανειακή συγκόλληση με τριβή έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε ολόκληρη τη βιομηχανία παραγωγής. Με αυτήν επιτυγχάνονται ισχυρές συγκολλήσεις για όλες τις γεωμετρίες, ανεξάρτητα από τον τύπο της διεπαφής συγκόλλησης που απαιτείται, επιτρέποντας συνδυασμούς μεταξύ σωλήνων, ράβδων, πλακών, δίσκων κ.λπ. Επιπλέον, επιτυγχάνονται στενότερες θερμομηχανικά επηρεασμένες ζώνες κατά την συγκόλληση, διασφαλίζοντας έτσι την διατήρηση περισσότερων ιδιοτήτων του μητρικού υλικού στην ραφή της συγκόλλησης, κατανέμοντας τις ομοιόμορφα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η υψηλότερη απόδοση των ενώσεων μέσα από ισχυρότερες συγκολλήσεις. Ακόμη, οι σχετικά σύντομοι χρόνοι συγκόλλησης συμβάλλουν στην εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος, διότι μειώνοντας την διάρκεια ενός κύκλου, αυτομάτως περισσότερα μέρη μπορούν να συγκολληθούν σε λιγότερο χρόνο. Επίσης,

έχει παρατηρηθεί αυξημένη μηχανική αντοχή, η οποία οφείλεται στην ελικοειδή ροή της συγκόλλησης. Ειδικότερα, η χρήση σφονδύλου προκαλεί ελικοειδή ροή στην ραφή. Αυτό αυξάνει τη μηχανική αντοχή της ένωσης καθώς επίσης και τη συνολική αντοχή του υλικού στην συγκεκριμένη περιοχή. Η διαχείριση της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ιδιαίτερα εύκολη, καθώς απαιτούνται μόνο δύο παράμετροι ελέγχου ποιότητας, η ταχύτητα περιστροφής του ενός υλικού (rpm) και εφαρμοζόμενη πίεση (Pa). Επειδή, τόσο η ταχύτητα περιστροφής όσο και η πίεση ελέγχονται από μηχανή, η διαδικασία εκτελείται πλήρως αυτοματοποιημένα επιτυγχάνοντας ποιοτική συγκόλληση ανεξάρτητα από το επίπεδο δεξιοτήτων του χειριστή. Καμία άλλη διαδικασία συγκόλλησης δεν έχει τόσο λίγες μεταβλητές ελέγχου, καθιστώντας τον ποιοτικό έλεγχο, την παρακολούθηση και την αντιμετώπιση προβλημάτων πολύ πιο εύκολη, ταχύτερη και οικονομική [10] [11].

Τόσο η συνεχής όσο και η αδρανειακή συγκόλληση παρουσιάζονται διαγραμματικά στην **Εικόνα 2** που ακολουθεί. Σε αυτήν διακρίνονται τα δύο προς συγκόλληση στοιχεία, ο κινητήρας που περιστρέφει το ένα υλικό και στις δύο περιπτώσεις, καθώς και το δεύτερο υλικό που πιέζεται, μέσω υδραυλικού ή άλλου συστήματος, πάνω στο πρώτο.



Εικόνα 2. Τα στάδια συγκόλλησης υλικών για τις μεθόδους *Continuous Friction Welding* και *Inertia Friction Welding*.

2.3 Περιγραφή της διαδικασίας

Αρχικά, τα εξαρτήματα φορτώνονται στον εξοπλισμό συγκόλλησης, ο οποίος συνήθως είναι κατάλληλο μηχάνημα ή τόννος μετά από μετατροπές, όπως θα αναλυθεί αργότερα.

Έπειτα, το μηχάνημα ρυθμίζεται κατάλληλα για κάθε εργασία και ταυτόχρονα γίνεται συνεχής έλεγχος των 3 βημάτων με μια σειρά παραμέτρων, διαφορετικών για κάθε εργασία. Οι παράμετροι αυτοί είναι η ταχύτητα περιστροφής, η αξονική δύναμη και η απόσταση των δύο τεμαχίων. Αφού οριστούν οι τρεις παράμετροι, καταγράφονται και διατηρούνται για χρήση καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας. Τα τρία κύρια βήματα παρατίθενται παρακάτω.

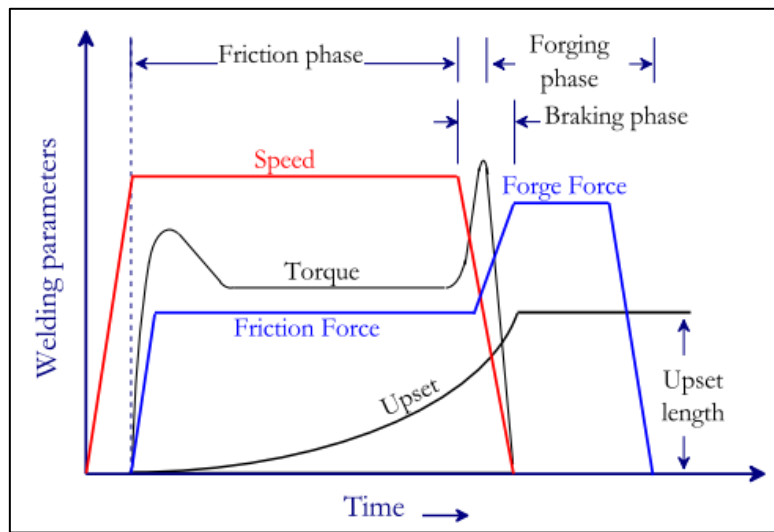
- 1) Το ένα τεμάχιο εργασίας συγκρατείται σταθερό. Το δεύτερο περιστρέφεται σε έναν άξονα, με μια προκαθορισμένη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής. Μετά την ορισθείσα χρονική περίοδο, εφαρμόζεται συγκεκριμένη αξονική δύναμη, κατάλληλη για την κάθε κατεργασία.
- 2) Μετά την παρέλευση του προκαθορισμένου χρόνου του προηγούμενου βήματος, εφαρμόζεται μια δεύτερη πίεση μέχρι να υπάρξει η επιθυμητή θερμοκρασία και κατάσταση του υλικού. Σε αυτό το στάδιο τα δύο υλικά πλαστικοποιούνται μέσω πλαστικής και μη αντιστρεπτής παραμόρφωσης. Μέσα από έλεγχο που μετράει την "απώλεια μήκους" ενεργοποιείται το φρένο του κινητήρα όταν το εξάρτημα φτάσει στο προγραμματισμένο συνολικό μήκος.
- 3) Η περιστροφή έχει σταματήσει. Στη συνέχεια εφαρμόζεται επιπρόσθετη αξονική τάση, η λεγόμενη «πίεση σφυρηλάτησης», για εξίσου συγκεκριμένο χρόνο. Μετά και από αυτόν τον χρόνο η συγκόλληση έχει ολοκληρωθεί.

2.4 Παράμετροι κατεργασίας

Απόρροια των προηγούμενων κεφαλαίων είναι το γεγονός ότι η διαδικασία της περιστροφικής συγκόλλησης με τριβή χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Κατά την διάρκεια των τριών αυτών φάσεων υπάρχουν πέντε παράγοντες που καθορίζουν το αποτέλεσμα της συγκόλλησης, ενώ παράλληλα αποτελούν και μέσα ελέγχου της ποιότητά της [12]. Οι παράγοντες αυτοί είναι

- α. Ο χρόνος τριβής (Friction time: F_t (s))
- β. Ο χρόνος σφυρηλάτησης (Forging time: F_{gt} (s))
- γ. Η πίεση τριβής (Friction pressure: F_p (Pa))
- δ. Η πίεση σφυρηλάτησης (Forging pressure: F_{gp} (Pa))
- ε. Ταχύτητα περιστροφής (Rotational speed: V (rpm))

Στην **Εικόνα 3**, που ακολουθεί, παρουσιάζονται σχηματικά οι παραπάνω παράγοντες της κατεργασίας.



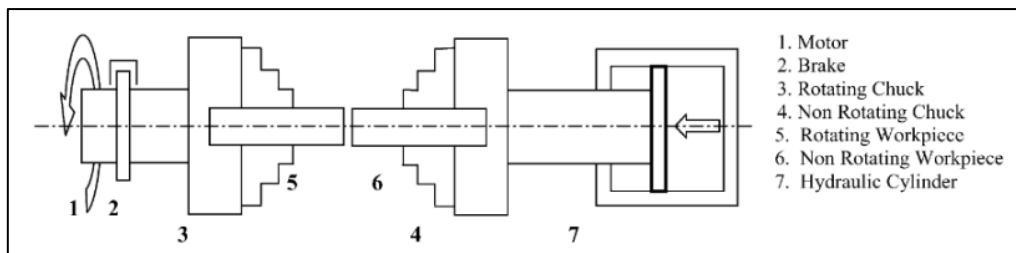
Εικόνα 3. Παράμετροι κατεργασίας και φάσεις σε σχηματική απεικόνιση συναρτήσεϊ του χρόνου [13].

Ως Χρόνος Τριβής (Friction Time) ορίζεται η χρονική διάρκεια επαφής του περιστρεφόμενου τεμαχίου με το ακίνητο, όπου ταυτόχρονα ασκείται προκαθορισμένη επιθυμητή πίεση μεταξύ τους. Η πίεση που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια αυτή ονομάζεται πίεση τριβής (Friction Pressure). Η χρονική διάρκεια που ασκείται επιπλέον πίεση, αφότου πρώτα η περιστροφή έχει σταματήσει, καλείται χρόνος σφυρηλάτησης (Forging Time) και η αντίστοιχη ασκούμενη πίεση, πίεση σφυρηλάτησης (Forging Pressure). Το περιστρεφόμενο κομμάτι έχει συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής (Rotational Speed), ενώ οι τιμές των παραμέτρων επιλέγονται με γνώμονα με τα προς συγκόλληση υλικά και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά

Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο τομέα της μαζικής παραγωγής. Το σχετικά υψηλό κόστος εξοπλισμού αντισταθμίζεται από τον υψηλό ρυθμό παραγωγής και τις χαμηλότερες απαιτήσεις εργασίας. Εφαρμόζεται σε πολλά υλικά με διαφορετικές διαστάσεις κάτι το οποίο την καθιστά ιδανική για την συγκόλληση εξαρτημάτων με μικρές διαστάσεις. Με βάση αυτά τα πλεονεκτήματα, η συνεχής συγκόλληση δια τριβής έχει ευρεία εφαρμογή στην βιομηχανία.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή της μηχανής

Η συνήθης μορφή μιας μηχανής που χρησιμοποιείται για περιστροφικές συγκολλήσεις με τριβή έχει την μορφή τόννου όπως φαίνεται και σχηματικά στην **Εικόνα 4** που ακολουθεί. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, στοχεύεται η κατεργασία να πραγματοποιηθεί σε έναν κλασικό τόννο, ο οποίος μετά από μετατροπές και κατάλληλες προσθήκες λογισμικού και hardware, απετέλεσε την πλέον βέλτιστη και οικονομικά αποδεκτή επιλογή.



Εικόνα 4. Διάταξη και μέρη μιας τυπικής μηχανής CFW με υδραυλικό σύστημα προώθησης του chuck [12].

Το σύστημα συγκράτησης του περιστρεφόμενου τεμαχίου απεικονίζεται από τα εξαρτήματα 1 έως 5. Το εξάρτημα 1 είναι συνδεδεμένο στο μοτέρ, το οποίο εξασφαλίζει την περιστροφή του chuck με κατάλληλα προεπιλεγμένη ταχύτητα, ανάλογα με την εκάστοτε φάση της κατεργασίας. Το εξάρτημα 2 συνδέεται με τον φρένο της διάταξης, το οποίο ενεργοποιείται για την επιβράδυνση και ακινητοποίηση του chuck που φέρει το περιστρεφόμενο τεμάχιο. Το chuck περιστροφής και το τεμάχιο απεικονίζονται με τους αριθμούς 3 και 5 αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, το εξάρτημα 4 αποτελεί το chuck στο οποίο συγκρατείται ακίνητο το δεύτερο τεμάχιο που περιγράφεται από τον αριθμό 6. Τέλος, το εξάρτημα 7 αποτελεί το υδραυλικό σύστημα που επιτρέπει την αξονική κίνηση του μη περιστρεφόμενου τεμαχίου, ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη επαφή και κατ' επέκτασιν δύναμη μεταξύ των τεμαχίων.

Η πίεση τριβής (Friction Pressure) και σφυρηλάτησης (Forging Pressure) προέρχονται από το υδραυλικό σύστημα, για την προκειμένη διάταξη. Είναι όμως εφικτό, και μερικές φορές περισσότερο οικονομικό, έναντι του υδραυλικού συστήματος να χρησιμοποιούνται κατάλληλες διατάξεις από έναν ή και περισσότερους ηλεκτροκινητήρες, ο έλεγχος των οποίων επιτρέπει την ανάπτυξη των επιθυμητών πιέσεων για καλύτερα αποτελέσματα. Ένα από τα σημαντικότερα μέρη της μηχανής για την υλοποίηση της κατεργασίας αποτελεί το σύστημα ελέγχου, καθώς όλες οι επιμέρους μονάδες της μηχανής ελέγχονται από αυτό.

Η υπάρχουσα διάταξη του εργαστηρίου, όπου στοχεύεται να πραγματοποιηθούν σε αυτήν οι πειραματικές δοκιμές, αποτελείται από έναν τόννο (HAAS TL-1) ο οποίος έχει τροποποιηθεί κατάλληλα (E. Pierron: 'Development of an automated friction welding machine', Internship Report, ENSAM-NTUA, 2022). Πιο συγκεκριμένα έγινε μελέτη και δοκιμές για την τοποθέτηση σερβομοτέρ (AC Brushless Servomotor της Telemecanique) και κατάλληλου μειωτήρα, ο οποίος θα αυτοματοποιεί το κομμάτι της αξονικής προσέγγισης των δύο τεμαχίων, που στην συγκεκριμένη εργαλειομηχανή γινόταν χειροκίνητα, και θα ελέγχεται από την μονάδα PLC (N. Μπεγιάζης: 'Σχεδιασμός αυτόματης διάταξης συγκόλλησης δια τριβής με περιστροφή ενσωματωμένης σε τόννους CNC', Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ 2021).

Η μονάδα ελέγχου PLC αποτελεί τον «εγκέφαλο» του σχεδιασμού, αφού όλη η διαδικασία εκτελείται με βάση το πρόγραμμα που είχε αναπτυχθεί. Συγκεκριμένα, είχε επιλεγεί το PLC S7-200 της οικογένειας Simatic S7 της εταιρίας Siemens, βασικά μέρη του οποίου είναι το CPU, η μονάδα τροφοδοσίας, και το σύνολο των εισόδων και εξόδων. Ειδικότερα, το PLC S7-200 CPU 224XP DC/DC/DC που χρησιμοποιείται, αποτελείται από 14 ψηφιακές εισόδους, 10 ψηφιακές εξόδους, 2 αναλογικές εισόδους και 1 αναλογική έξοδο. Το τροφοδοτικό εξασφαλίζει την απαραίτητη τάση και ισχύ που είναι απαραίτητη για την λειτουργία του PLC και των μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν για την επέκταση των λειτουργιών του.

Οι κινήσεις της μηχανής ρυθμίζονται μέσα από ένα σύνολο αισθητήρων οι οποίοι θα ελέγχουν την έναρξη και τον τερματισμό της κατεργασίας (limit switch αισθητήρας), την πίεση που αναπτύσσεται μεταξύ των τεμαχίων (αισθητήρας πίεσης με την μορφή δακτυλίου τοποθετημένος στο ακίνητο chuck) καθώς και τον χρόνο της κάθε φάσης της κατεργασίας μέσω timer που ελέγχεται κατευθείαν από την μονάδα PLC. Η μέτρηση της πίεσης προκύπτει από την εκμετάλλευση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Η τιμή της πίεσης μεταφράζεται από τον αισθητήρα σε αναλογικό σήμα το οποίο λαμβάνεται και επεξεργάζεται από το PLC. Για την επίτευξη καλύτερων σημάτων από τους αισθητήρες, αναπτύχθηκε κατάλληλο κύκλωμα γέφυρας και ενισχυτή τα οποία ελέγχονταν μέσω Arduino που ήταν συνδεδεμένο με την κεντρική μονάδα του PLC.

Η «επικοινωνία» μεταξύ ανθρώπου και μηχανής επιτεύχθηκε μέσω της συσκευής HMI TD 200 που επιτρέπει στον χρήστη να αλληλεπιδρά με την εφαρμογή, απεικονίζοντας διάφορες πληροφορίες ή μηνύματα που σχετίζονται με τους αισθητήρες ή την κατάσταση των μηχανών.

Κεφάλαιο 4: Βιβλιογραφική ανασκόπηση συγκόλλησης υλικών με τριβή

Σε αυτό το σημείο θα μελετηθεί η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί από άλλους επιστήμονες σχετικά με την συγκόλληση υλικών με την τεχνική της περιστροφικής συγκόλλησης με τριβή. Στους Πίνακες που βρίσκονται στο τέλος κάθε υποκεφαλαίου είναι συγκεντρωμένα όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη την εκπαίδευση και τον έλεγχο των νευρωνικών δικτύων.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε αφορά μόνο μεταλλικά υλικά και χωρίζεται σε τρεις βασικές κατηγορίες αναφορικά με το βασικό υλικό που μελετήθηκε. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει συγκολλήσεις αλουμινίου με παρόμοια ή διαφορετικά υλικά. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι συγκολλήσεις χαλύβων με διάφορα, όμοια ή διαφορετικά υλικά και τέλος στην Τρίτη κατηγορία ανήκουν οι συγκολλήσεις διαφόρων άλλων υλικών. Συνολικά μελετήθηκαν περισσότερα από 60 άρθρα και μετά από διαλογή με βάση το επιστημονικό περιεχόμενο, την τεκμηρίωση αλλά και το ενδιαφέρον της έρευνας κάθε άρθρου, επιλέχθηκαν 40 τα οποία και περιλαμβάνουν τους συνδυασμούς υλικών και συνθηκών που θα παρουσιαστούν στους Πίνακες 1 έως 3.

4.1 Μελέτη συγκολλήσεων Αλουμινίου

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους E. Taban et al. [14] μελετήθηκαν τα αποτελέσματα της αδρανειακής συγκόλλησης αλουμινίου 6061-T6 με χάλυβα AISI 1018 για δύο διαφορετικές συνθήκες πίεσης σφυρηλάτησης με τις υπόλοιπες συνθήκες ίδιες. Έπειτα για την εξαγωγή αποτελεσμάτων τα δοκίμια εξετάστηκαν με εφελκυσμό και κάμψη.

Στην έρευνα των M. Cheeru και W. S. Che [15], μελετήθηκε η συγκόλληση τιτανίου τύπου-2 και χάλυβα 304 SS με την χρήση καθαρού αλουμινίου ως ενδιάμεσο στρώμα. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκαν μηχανικές δοκιμές, μελέτη διάχυσης του αλουμινίου αλλά και μελέτη XRD. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 6 διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων συγκόλλησης.

Οι S. R. S. Bharathi et al. [16] μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της μικροδομής της συγκόλλησης διαφόρων συνδυασμών μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου AA2024 και AA6061.

Οι Ch. Muralimohan et al. [17] μελέτησαν την συγκόλληση του βιομηχανικού τύπου αλουμινίου AA6082-T6 με καθαρό χαλκό, μέσα από συνεχή περιστροφική συγκόλληση. Εφαρμόστηκαν διαφορετικοί χρόνοι τριβής, από 1 έως 4 sec ενώ και η πίεση σφυρηλάτησης κυμάνθηκε από 80 έως 160 MPa.

Παράλληλα, οι E.P. Alves et al. [18] ερεύνησαν την συγκόλληση αλουμινίου AA1050 (99.5% αλουμίνιο) με δομικό χάλυβα AISI 304. Στόχος της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η χρήση αυτού του είδους συγκολλήσεων στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Η συγκόλληση μελετήθηκε, πέραν άλλων, με δοκιμή εφελκυσμού ενώ επίσης λήφθηκαν και μετρήσεις μικροσκληρότητας στην κλίμακα Vickers.

Σε μια ακόμη έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους U. M. Basheer et al. [19] μελετήθηκε μια πρωτοποριακή για τα δεδομένα των συγκολλήσεων προσπάθεια ένωσης κεραμικού υλικού με ένα μεταλλικό. Συγκεκριμένα, επιχειρήθηκε η συγκόλληση αλουμινίου 6061 με ράβδο Αλουμίνιας. Με την επίτευξη της συγκόλλησης τα δοκίμια εξετάστηκαν μέσω μηχανικών δοκιμών και μελέτη της μικροδομής τους. Παρόμοια έρευνα πραγματοποιήθηκε και από τους M.B. Uday et al. [20] όπου και σε αυτή την περίπτωση έγινε προσπάθεια συγκόλλησης αλουμινίου 6061 με σύνθετο Αλουμίνιας-YSZ (Yttria stabilized Zirconia).

Πίνακας 1. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση με βασικό υλικό του Αλουμίνιο.

Υλικό	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Πίεση Τριβής (MPa)	Δύναμη Τριβής (N)	Πίεση Σφυρηλάτησης (MPa)	Δύναμη Σφυρηλάτησης (N)	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Χρόνος τριβής (s)	Χρόνος σφυρηλάτησης (s)
6061-T6 aluminum - AISI 1018 steel	12,5	-	23	2822,52465	50/60	6135,92 / 7363,10	4200	1	5
grade-2 titanium - Aluminum - 304 SS	16	100	120	24127,43	110 / 120 / 130 / 140 / 150 / 160	22116,81 / 24127,43 / 26138,05 / 28148,67 / 30159,28 / 32169,90	2000	3/4/5	6
AA2024 - AA6061	12	75	37,28 / 67,63 / 107,52	4216,86 / 7649,19 / 12160,25	-	-	1100/1200	3/4/5	3/4/5
6082-T6 aluminum - Pure copper	20	120	110	34557,51	80 - 160	25132,74 / 50265,48	1500	1/2/3/4	6
AA1050 - AISI 304	14,8	100	2,1	361,27	1,4	240,84	3200	32	2
6061 Aluminum - alumina	15	50	14	2474,004215	-	-	1250/ 1800 / 2500	30	-
YSZ-alumina composite - 6061 aluminum alloy	16	50	7	1407,43	10	2010,61	1800	60	45

4.2 Μελέτη συγκόλλησης Χαλύβων/Σιδήρου

Λόγω της ομοιότητας και της μικρότερης ποικιλίας υλικών που μελετήθηκαν στο παρόν υποκεφάλαιο, καθώς και για εξοικονόμηση χώρου, επιλέχθηκε να γίνει μια πιο περιληπτική παρουσίαση και ανάλυση των άρθρων και των ερευνών που μελετήθηκαν. Πολλές από τις έρευνες και τα άρθρα της ανασκόπησης αφορούσαν συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ ίδιων ή παρόμοιων χαλύβων, στις οποίες μελετήθηκαν τα αποτελέσματα της συγκόλλησης μέσω μηχανικών δοκιμών καθώς και η ποιότητα της με μικροσκοπία και άλλες μεθόδους.

Στις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από τους R. Winiczenko et al. [21], τον N. Ozdemir [22], τους S. Celik et al. [23], τους N. Arivazhagan et al. [24], τους S. Bati et al. [25], τους V.V. Satyanarayana et al. [26], τους S. A. A. Akbari Mousavi et al. [27], τους G. Verma et al. [28], τον D. Ananthapadmanaban [29], τους Ý. Kirik1 et al. [30], τους G Subhash Chander et al. [31], τον Mumin Sahin [32] [33], τους A, Handa et al. [34], τους J. A. James et al. [35], τους T. Udayakumar et al. [36] και από τους M. Azizieh et al. [37] μελετήθηκαν οι συγκολλήσεις χαλύβων όμοιων, διαφορετικών ακόμα και ίδιων, οι μηχανικές αντοχές και η δομική ακεραιότητα της ένωσης με μηχανικές δοκιμές και μεταλλογραφικές μελέτες της μικροδομής τους. Στον Πίνακα 2, είναι συγκεντρωμένες οι παράμετροι των κατεργασιών.

Πίνακας 2. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση μεταξύ χαλύβων.

Υλικό	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Πίεση Τριβής (MPa)	Δύναμη Τριβής (N)	Πίεση Σφουρηλάτησης (MPa)	Δύναμη Σφουρηλάτησης (N)	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Χρόνος τριβής (s)	Χρόνος σφουρηλάτησης (s)
ductile iron - stainless steel	20	100	63,66 - 143,24	20000 - 45000	-	-	2360	120 - 170	-
AISI 304L - AISI 4340	12	30	40	4523,893421	60	6785,84	1500/1700/2000/2300/2500	5	10
AISI 4140 - AISI 1050	10	80	81 / 121,5 / 162	6361,72/9542,58/12723,45	162	12723,45	3000	4\6\8	14
AISI 304 - AISI 4140	25	55	76,39	37500	101,85	50000	1500	burn-off length 5/7/9/12 mm	-
AISI 304 - AISI 8640	10	70	50	3926,99	100	7853,98	1800	2/4/6/8/10	10
AISI 304 - AISI 430	18	-	15,72 / 23,58	4000 / 6000	31,43 / 47,15	8000 / 12000	1500	burn-off length 3/5 mm	-
4340 Steel-Mild Steel	20	100	50	15707,96	75	23561,94	3000	6	-
1045 - 1045	10	100	216,45	17000	-	-	1133	30	-
Carbon Steel - Stainless Steel	12,5	50	160	19634,95	280	34361,17	1000	burn-off length 1 mm	-
AISI 1040-AISI 304L	12	100	30	3392,92	60	6785,84	1700	4	2
AISI 304-AISI 4140	12	100	132,63	15000	353,67	40000	1500	burn-off length of 4 mm	-
Austenitic-stainless steel	15	100	60	10602,87	110	19438,6	1440	9	20
AISI 304L - AISI 4340	12	90	40	4523,89	60	6785,84	2500	5	10
AISI 1021 αυτοφής	20	100	40	12566,37	120	37699,11	1250	συνεχώς	-
ST37 steel CK60 steel	15	100	22,63	4000	33,95	6000	1400	5	-
AISI 1040 and S5304	10	75	34,96	2745,86	196,03	15396,44	2300	burn-off length 4 mm	-
UNS S32760	16	100	40/80/120	8042,47 / 16084,95 / 24127,43	122/146/170	24529,55 / 29355,04 / 34180,52	1000/1500/2000	burn-off length 2/4/6 mm	-

4.3 Μελέτη συγκολλήσεων μεταξύ Χαλύβων και Αλουμινίου

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα αναλυθεί η κατηγορία συγκολλήσεων μεταξύ χαλύβων με το Αλουμίνιο. Τα άρθρα που μελετήθηκαν παρατίθενται στην συνέχεια, ενώ οι παράμετροι των κατεργασιών παρατίθενται στον Πίνακα 3 στο τέλος του υποκεφαλαίου.

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους H. Seli et al. [38] μελετήθηκαν συγκολλήσεις μεταξύ ράβδων μαλακού χάλυβα και ράβδων αλουμινίου. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα έρευνα μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες της ένωσης με σκοπό την δημιουργία ενός μοντέλου κατανομής των θερμοκρασιακών επιδράσεων στα υλικά.

Στην έρευνα των S. D. Meshram et al. [39] μελετήθηκαν συγκολλήσεις μεταξύ αλουμινίου AA6061 σειράς 6 με χάλυβα AISI 4340, μέσω συνεχούς περιστροφικής συγκόλλησης. Έπειτα, τα δείγματα μελετήθηκαν μεταλλογραφικά καθώς επίσης και με ακτίνες-X, ενώ προέκυψε ότι το στρώμα ενδομεταλλικών ενώσεων που σχηματίζεται στην περιοχή της ένωσης έχει μικρές αντοχές σε εφελκυσμό με ελάχιστη ολκιμότητα.

Σε παρόμοια έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους P. Venkat Koushik et al. [40] μελετήθηκε συγκόλληση μεταξύ αλουμινίου H30 με μαλακό χάλυβα BS970, ενώ τα αποτελέσματα της συγκόλλησης μελετήθηκαν με μεταλλογραφικό έλεγχο, σκληρομέτρηση σε κλίμακα Rockwell και αντοχή σε εφελκυσμό.

Σε ακόμη μια έρευνα από τους Shubhavardhan R. N. και Surendran S. [41] μελετήθηκε η συγκόλληση μεταξύ χάλυβα AISI 304 με αλουμίνιο σειράς έξι AA6082 για διάφορους συνδυασμούς πιέσεων και χρόνων τριβής. Τα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από μελέτη αντοχής σε εφελκυσμό, σκληρομέτρηση και μικροσκληρομέτρηση σε κλίμακα Vickers κατά μήκος των δοκιμίων καθώς και δοκιμές κόπωσης και ελέγχου της μικροδομής.

Στην έρευνα των C. H. Muralimohan et al. [17] μελετήθηκαν συγκολλήσεις μεταξύ ράβδων χάλυβα AISI 1040 και αλουμινίου 6082-T6, μέσα από διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα για τον καλύτερο συνδυασμό παραμέτρων προέκυψαν μετά από δοκιμές στις μηχανικές ιδιότητες της ένωσης αλλά και από μελέτη και χαρακτηρισμό της μικροδομής της ένωσης.

Στην έρευνα των Y. Lekhana et al. [42] μελετήθηκαν συγκολλήσεις μεταξύ κοίλων σωλήνων από ανοξείδωτο χάλυβα SS316 με αλουμίνιο σειράς ένα, AA1100 πραγματοποιώντας παράλληλα μελέτη της συγκολλησιμότητας τους.

Τέλος, οι S. S. Deulkar et al. [43] μελέτησαν πειραματικά την συγκόλληση μεταξύ του κράματος αλουμινίου Al-63400 και του σιδήρου 410WA, ενώ προχώρησαν και ένα βήμα περισσότερο με την πραγματοποίηση στατιστικών αναλύσεων και μελετών προς εξαγωγή των καλύτερων παραμέτρων της κατεργασίας.

Πίνακας 3. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση μεταξύ χαλύβων και αλουμινίου.

Υλικά	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Πίεση Τριψής (MPa)	Δύναμη Τριψής (N)	Πίεση Σφυρηλάτησης (MPa)	Δύναμη Σφυρηλάτησης (N)	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Χρόνος τριψής (s)	Χρόνος σφυρηλάτησης (s)
Mild steel - aluminum	10	50	20	1570,79	30	2356,19	500	2	1
H30 aluminum – B5970 mild steel	8	200	80	4021,23	160	8042,47	3000	4	5
AISI 304 austenitic stainless steel - AA6082 aluminum	15	100	104	18378,31	210	37110,06	1400	5	6
6082-T6 aluminum alloy - 1040 steel	10	80	180	14137,16	-	-	1200	4	-
316 Stainless Steel - AA1100 Alloy	25,4	100	70	35469,52	122,5	62071,66	1800	5	-
AA6061 to AISI 4340	16	50	14,92	3000	29,84	6000	2400	burn-off length 2 mm	-
(Al63400) - Mild steel (Fe 410WA)	20	100	20	6283,18	40	12566,37	1400	0,5	3

4.4 Μελέτη συγκολλήσεων μεταξύ Χαλύβων με άλλα υλικά

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρατίθενται άρθρα από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με την συγκόλληση χαλύβων με διάφορα υλικά. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν άρθρα για συγκολλήσεις με υλικά όπως ο χαλκός, το τιτάνιο και το νικέλιο. Στον Πίνακα 4 φαίνονται οι παράμετροι των κατεργασιών.

Στην έρευνα των H.C. Dey et al. [44] έγινε μελέτη της συγκόλλησης τιτανίου με ανοξείδωτο χάλυβα SS304L για εφαρμογές στην βιομηχανία των πυρηνικών για αποφυγή διαρροών κατά την μεταφορά καυσίμων μέσα σε νιτρικό οξύ. Και σε αυτή την έρευνα έγιναν δοκιμές με διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων.

Στην έρευνα των S.D. Meshram et al. [45] μελετήθηκαν συγκολλήσεις καθαρών μετάλλων με χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι συγκολλήσεις μεταξύ χάλυβα και τιτανίου, μεταξύ χάλυβα και χαλκού καθώς και μεταξύ χάλυβα και νικελίου, διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους της κατεργασίας για όλες τις συγκολλήσεις.

Στην έρευνα των Shanjeevi. C et al. [46] μελετήθηκε η συγκόλληση μεταξύ καθαρού χαλκού με χάλυβα για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων της κατεργασίας. Τα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από δοκιμές εφελκυσμού και σκληρότητας, καθώς και από μελέτη της μικροδομής. Η ίδια ομάδα επιστημόνων πραγματοποίησε μια ακόμη έρευνα πάνω στην συγκόλληση χαλκού με χάλυβα, λίγα χρόνια αργότερα, δοκιμάζοντας αυτή την φορά διαφορετικούς συνδυασμούς ταχύτητας περιστροφής των δοκιμίων κατά την συγκόλληση [47].

Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Huihong Liu και Hidetoshi Fujii [48] και σχετίζεται με την συγκόλληση ανοξείδωτου χάλυβα SUS316L με κράμα τιτανίου-αλουμινίου-βαναδίου (Ti-6Al-4V). Και σε αυτή την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν αρκετοί διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων κατεργασίας με στόχο την εύρεση εκείνου που η συγκόλληση θα έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

Τέλος, στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους J. Alex Anandaraj et al. [49] μελετήθηκε η συγκόλληση κράματος νικελίου In718 με ανοξείδωτο χάλυβα SS410, με στόχο την βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας για την επίτευξη των καλύτερων δυνατών συγκολλήσεων μεταξύ των δύο αυτών υλικών.

Πίνακας 4. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση μεταξύ χαλύβων και άλλων υλικών

Υλικά	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Πίεση Τριβής (MPa)	Δύναμη Τριβής (N)	Πίεση Σφουρηλάτησης (MPa)	Δύναμη Σφουρηλάτησης (N)	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Χρόνος τριβής (s)	Χρόνος σφουρηλάτησης (s)
Ti - 304L stainless steel	14/18	100	100/200	15393,8 / 50893,8	450	69272,11 / 114511,05	1500	burn-off length 1 mm	5
Fe-Ti	4	25	238,73	3000	397,88	5000	1000	burn-off length 3/5 mm	-
Fe-Cu	4	25	238,73	3000	397,88	5000	1000	burn-off length 3/5 mm	-
Fe-Ni	4	25	238,73	3000	397,88	5000	1000	burn-off length 3/5 mm	-
stainless steel - copper	24	75	43	19452,74	108	48858,04	1500	burn-off length 1 mm	-
Ti-6Al-4V alloy and SUS316L stainless steel	10	100	450	35342,9	-	-	40	burn-off length of 4 mm	-
Copper Ferritic stainless steel	24	75	43	19452,74	65	29405,30724	1000	burn-off 3	-
Inconel 718 and AISI410	12	100	220	24881,41382	220	24881,41382	1300	10	10

4.5 Μελέτη συγκολλήσεων μεταξύ διαφόρων υλικών

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν εργασίες οι οποίες πραγματεύονται συγκολλήσεις διαφόρων άλλων υλικών, που δεν αναφέρθηκαν προηγουμένως, μεταξύ τους. Επίσης, όπως και πριν, στο τέλος του υποκεφαλαίου υπάρχει αντίστοιχος πίνακας που περιέχει τις παραμέτρους των κατεργασιών (Πίνακας 5).

Στην εργασία των S.D. Meshram et al. [45] μελετήθηκαν συγκολλήσεις μεταξύ καθαρού τιτανίου με χαλκό καθώς επίσης και χαλκού με νικέλιο διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους της κατεργασίας για όλες τις συγκολλήσεις.

Στην έρευνα των Hongying Wang et al. [50] μελετήθηκε η αυτοφυής συγκόλληση ενός κράματος τιτανίου TC21 μέσα από αδρανειακή συγκόλληση με περιστροφή. Το συγκεκριμένο υλικό TC21 (Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr- 2Nb-0.1Si) είχε μορφολογία κοίλου κυλίνδρου. Χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες παράμετροι κατεργασίας, ενώ τα αποτελέσματα μελετήθηκαν με έλεγχο της μικροδομής, SEM, ανάλυση του προσανατολισμού των κρυσταλλιτών, των φάσεων και των στοιχείων του υλικού.

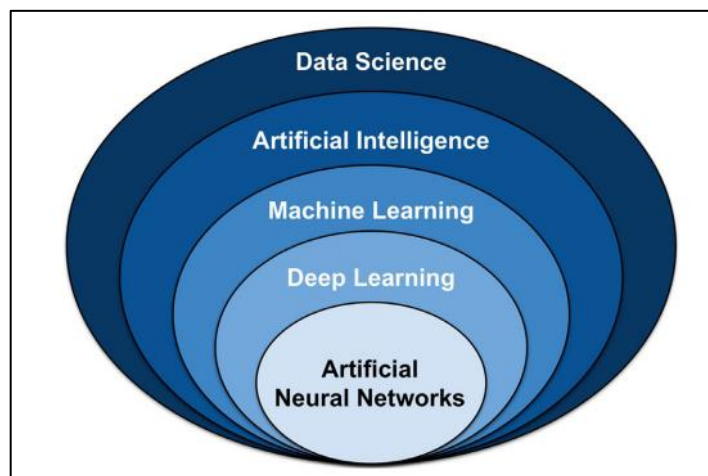
Τέλος, στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Mojtaba Sadeghi Gogheri et al. [51] μελετήθηκε η συγκόλληση καθαρού τιτανίου με κράμα μαγνησίου AZ31. Πιο συγκεκριμένα, έγινε βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατεργασίας μέσα από μοντελοποίηση, ενώ και εδώ έγινε πληθώρα δοκιμών με διαφορετικές κάθε φορά παραμέτρους.

Πίνακας 5. Παράμετροι κατεργασίας για συγκόλληση μεταξύ διαφόρων υλικών

Υλικά	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Πίεση Τριβής (MPa)	Δύναμη Τριβής (N)	Πίεση Σφρηλάττησης (MPa)	Δύναμη Σφρηλάττησης (N)	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Χρόνος τριβής (s)	Χρόνος σφρηλάττησης (s)
Ti-Cu	4	25	238,73	3000	397,88	5000	1000	burn-off length 3/5 mm	-
Cu-Ni	4	25	238,73	3000	397,88	5000	1000	burn-off length 3/5 mm	-
TC21 titanium alloys	in 65 out 135	300	76	835663,64	102	1121548,57	700	continuous	-
AZ31 magnesium alloy - pure titanium (cp-Ti)	20	80	50	15707,96	40	12566,37	1300	-	-

Κεφάλαιο 5: Εισαγωγή στα νευρωνικά δίκτυα

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 υπήρξε μια δραματική αύξηση στο επίπεδο της ερευνητικής δραστηριότητας στα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποτελούν υποκατηγορία της μηχανικής μάθησης και όχι μόνο, όπως σχηματικά φαίνεται στην **Εικόνα 5** που ακολουθεί. Ενώ μεγάλο μέρος της ερευνητικής προσπάθειας έχει ασχοληθεί με την ανάπτυξη θεμελιωδών αρχών και νέων αλγορίθμων, ενώ υπήρξε επίσης και μια αυξανόμενη ώθηση προς εφαρμογές που απαντώνται στον πραγματικό κόσμο. Τα νευρωνικά δίκτυα αντιπροσωπεύουν ένα εναλλακτικό υπολογιστικό παράδειγμα στο οποίο η λύση σε ένα πρόβλημα μαθαίνεται από ένα σύνολο παραδειγμάτων. Η έμπνευση για τα νευρωνικά δίκτυα προέρχεται αρχικά από μελέτες των μηχανισμών επεξεργασίας πληροφοριών σε βιολογικά νευρικά συστήματα, ιδιαίτερα στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Πράγματι, μεγάλο μέρος της τρέχουσας έρευνας στους αλγόριθμους νευρωνικών δικτύων επικεντρώνεται στην απόκτηση βαθύτερης κατανόησης της επεξεργασίας πληροφοριών σε βιολογικά συστήματα. Ωστόσο, οι βασικές έννοιες μπορούν επίσης να γίνουν κατανοητές από μια προσέγγιση στην επεξεργασία πληροφοριών [52] [53].



Εικόνα 5. Ομπρέλα επιλεγμένων τεχνικών της επιστήμης δεδομένων. Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) εμπίπτει στη σφαίρα της επιστήμης δεδομένων και περιλαμβάνει τον κλασικό προγραμματισμό και τη μηχανική μάθηση (ML). Η ML περιέχει πολλά μοντέλα και μεθόδους, όπως η βαθιά μάθηση (DL) και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) [54].

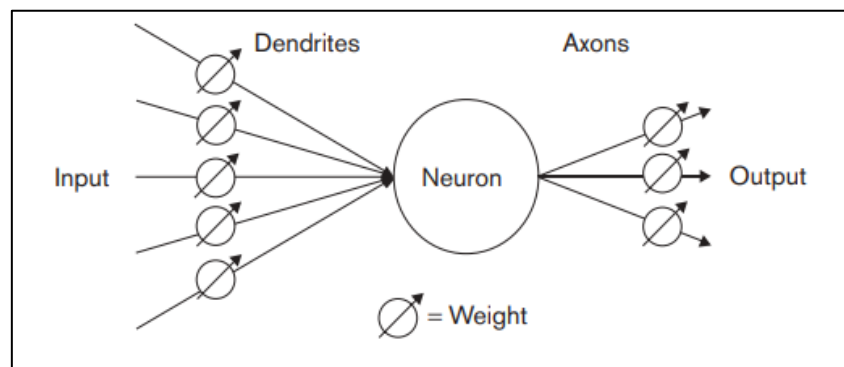
5.1 Η σχεδίαση των νευρωνικών δικτύων

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ή απλά νευρωνικό δίκτυο) αποτελείται από ένα στρώμα νευρώνων εισόδου (ή κόμβων, μονάδων), ένα, δύο (ή και τρία) κρυφά στρώματα νευρώνων και ένα τελικό στρώμα νευρώνων εξόδου. Στην **Εικόνα 6** φαίνεται διαγραμματικά μια τυπική

αρχιτεκτονική, όπου περιλαμβάνονται και οι γραμμές που συνδέουν τους νευρώνες. Κάθε σύνδεση σχετίζεται με έναν αριθμό που ονομάζεται *βάρος*. Η έξοδος, h_i , του νευρώνα i στο κρυφό στρώμα προκύπτει από την σχέση:

$$h_i = \sigma \left(\sum_{j=1}^N V_{ij} x_j + T_i^{hid} \right) \quad (1)$$

Όπου με $\sigma()$ συμβολίζεται η συνάρτηση μεταφοράς, με N ο αριθμός των νευρώνων εισόδου, με V_{ij} τα βάρη, με x_j οι εισοδοί στους νευρώνες εισόδου και T_i^{hid} οι όροι των κρυφών νευρώνων. Ο ρόλος της συνάρτησης μεταφοράς είναι, εκτός από την εισαγωγή της μη γραμμικότητας στο νευρωνικό δίκτυο, να δεσμεύσει την τιμή του νευρώνα έτσι ώστε το νευρωνικό δίκτυο να μην παραλύεται από αποκλίνοντες νευρώνες [55].



Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής ενός τυπικού νευρωνικού δικτύου [53].

Έχει αποδειχθεί ότι ένα νευρωνικό δίκτυο που κατασκευάστηκε όπως παραπάνω μπορεί να προσεγγίσει οποιαδήποτε υπολογίσιμη συνάρτηση με μια αυθαίρετη ακρίβεια. Οι αριθμοί που δίνονται στους νευρώνες εισόδου είναι ανεξάρτητες μεταβλητές και αυτοί που επιστρέφονται από τους νευρώνες εξόδου είναι εξαρτημένες μεταβλητές από τη συνάρτηση που προσεγγίζεται από το νευρωνικό δίκτυο. Οι εισοδοί και οι έξοδοι από ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να είναι δυαδικές (όπως ναι ή όχι) ή ακόμα και συμβολισμοί (πράσινο, κόκκινο, ...) όταν τα δεδομένα είναι κατάλληλα κωδικοποιημένα [55].

5.2 Η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων

Μετά την περιγραφή της αρχιτεκτονικής, σειρά έχει η ανάλυση ενός ακόμα σημαντικού μέρους των νευρωνικών δικτύων, το οποίο δεν είναι άλλο από την εκπαίδευση τους και τους

τρόπους με τους οποίους αυτή επιτυγχάνεται. Παρόμοια με την ανθρώπινη μάθηση, όπου χρησιμοποιούνται παραδείγματα, έτσι και ένα νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται παρουσιάζοντάς του ένα σύνολο δεδομένων εισόδου τα οποία αποτελούν το σύνολο εκπαίδευσης. Οι επιθυμητές έξοδοι των δεδομένων εκπαίδευσης είναι γνωστές εκ των προτέρων, έτσι ώστε μέσω της εκπαίδευσης το δίκτυο να ελαχιστοποιήσει μια συγκεκριμένη κάθε φορά συνάρτηση μεταφοράς (που συνήθως είναι το άθροισμα των τετραγωνικών διαφορών μεταξύ των εξόδων νευρωνικού δικτύου και των επιθυμητών εξόδων), ρυθμίζοντας κατάλληλα τα βάρη μεταξύ των συνδεδεμένων νευρώνων. Στη συνέχεια, ένα ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων, που ονομάζεται σύνολο επικύρωσης, μπορεί να εφαρμοστεί στα εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα με εκείνο που έχει τελικά την καλύτερη απόδοση να επιλέγεται. Μετά την επικύρωση, ένα άλλο ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων, που ονομάζεται δοκιμαστικό σύνολο, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του επιπέδου απόδοσης του νευρωνικού δικτύου, το οποίο περιγράφει την αξιοπιστία του νευρωνικού δικτύου. Θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι ένα νευρωνικό δίκτυο δεν μπορεί ποτέ να μάθει τι απουσιάζει από ένα σετ εκπαίδευσης. Το μέγεθος του συνόλου εκπαίδευσης πρέπει επομένως να είναι αρκετά μεγάλο ώστε το νευρωνικό δίκτυο να απομνημονεύει τα χαρακτηριστικά/τάσεις που είναι ενσωματωμένα στο κάθε σετ εκπαίδευσης. Από την άλλη πλευρά, εάν περιέχονται πάρα πολλές ασήμαντες λεπτομέρειες στο σετ εκπαίδευσης, το νευρωνικό δίκτυο μπορεί να σπαταλήσει τους πόρους του (βάρη) προσαρμόζοντας τον θόρυβο. Επομένως, μια συνετής επιλογή τόσο στον όγκο των δεδομένων όσο και στον τρόπο αναπαράστασή τους, είναι κρίσιμης σημασίας για την επιτυχημένη υλοποίηση των νευρωνικών δικτύων [55] [54].

Το επόμενο βήμα είναι να προσδιοριστεί ο αριθμός των κρυφών επιπέδων και ο αριθμός των νευρώνων σε ένα κρυφό στρώμα. Διαπιστώθηκε ότι τα νευρωνικά δίκτυα με ένα μόνο κρυφό στρώμα μπορούν να κάνουν το μεγαλύτερο μέρος της δουλειάς. Τα νευρωνικά δίκτυα δύσκολα έχουν περισσότερα από δύο κρυφά επίπεδα. Καθότι δεν υπάρχει θεωρία για τον αριθμό των κρυμμένων νευρώνων, οι ερευνητές βασίστηκαν στον πειραματισμό και οδηγήθηκαν σε μερικούς εμπειρικούς κανόνες, οι οποίοι δεν είναι πάντα σύμφωνοι μεταξύ τους [55].

Έστω ένα υποθετικό παράδειγμα, όπου το νευρωνικό δίκτυο είναι εκπαιδευμένο για να προτείνει στον χρήστη το αν θα αγοράσει ή θα πουλήσει μια μετοχή στο χρηματιστήριο. Η έξοδος του νευρωνικού δικτύου μπορεί να έχει μόνο έναν νευρώνα και επομένως είναι βαθμωτή. Εάν για παράδειγμα η έξοδος του νευρώνα δίνει μια τιμή μεγαλύτερη από 0.9, τότε

σημαίνει ότι ο χρήστης θα πρέπει να προβεί σε πώληση, αντίθετα, αν είναι μικρότερη από -0.9, τότε ο χρήστης θα πρέπει να επενδύσει σε αγορά της μετοχής. Οι τιμές μεταξύ -0.9 και 0.9 δεν οδηγούν σε καμία απόφαση. Για να αποφέρει κέρδη από το νευρωνικό δίκτυο, θα πρέπει να είναι σε θέση να προβλέπει σημεία καμπής στην εξελισσόμενη καμπύλη του δείκτη της συγκεκριμένης μετοχής. Πριν από την εκπαίδευση, θα πρέπει να έχει προηγηθεί η μελέτη της καμπύλης του δείκτη της μετοχής και να καταχωρηθούν κατάλληλα οι συνθήκες για αγορά και οι συνθήκες για πώληση, όταν ο δείκτης βρίσκεται σε τοπικό ελάχιστο και τοπικό μέγιστο αντίστοιχα. Όταν όμως ο δείκτης δεν βρίσκεται σε μια ακραία θέση, θα πρέπει οι έξοδοι του νευρωνικού δικτύου (στόχος) να καταχωρηθούν ως "χωρίς απόφαση". Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, τα βάρη του νευρωνικού δικτύου προσαρμόζονται κατάλληλα με στόχο τα αποτελέσματα του (αγορά, πώληση ή καμία απόφαση στο συγκεκριμένο παράδειγμα) να ταιριάζουν με τα επιθυμητά. Στη συνέχεια, ως συνάρτηση σφάλματος ορίζονται οι τετραγωνικές διαφορές μεταξύ των εξόδων του νευρωνικού δικτύου και των επιθυμητών εξόδων. Ωστόσο, θα μπορούσαν να αφαιρέσουμε όλα τα μοτίβα «χωρίς απόφαση» στη συνάρτηση σφάλματος, έτσι ώστε το νευρωνικό δίκτυο να μην σπαταλά τα βάρη για ασήμαντες διακυμάνσεις. Όμως και τα τρία μοτίβα χρειάζονται στις εισαγωγές καθώς συνθέτουν το συνεχές ιστορικό, αλλιώς το νευρωνικό δίκτυο θα έβγαζε συνεχώς ένα από τα δύο αποτελέσματα (αγορά ή πώληση). Το τελευταίο βήμα στο σχεδιασμό είναι ο συντονισμός των αριθμητικών τιμών και των βαρών. Μόλις το νευρωνικό δίκτυο αναπτυχθεί, η συχνή επανεκπαίδευση είναι βοηθητική και μερικές φορές υποχρεωτική, επειδή τα σημαντικά χρονικά μοτίβα μπορεί να έχουν μεταβληθεί από την τελευταία εκπαίδευση [55].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναπτυχθούν ορισμένα νευρωνικά δίκτυα, σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν, με στόχο την διασύνδεση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί, με τον χρήστη. Πιο συγκεκριμένα θα γίνει μια προσπάθεια εύρεσης των περισσότερο αποδεκτών παραμέτρων συγκόλλησης για δύο υλικά τα οποία θα εισάγονται από τον χρήστη μέσω ορισμένων φυσικών χαρακτηριστικών τους ή ακόμα και από τα ονόματά τους. Στα επόμενα κεφάλαια θα δειχθεί η διαδρομή αυτή προς την τελική ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων πάνω σε αυτόν τον άξονα αλληλεπίδρασης χρήστη- μηχανής.

Κεφάλαιο 6: Ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν 5 διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα μέσα στο περιβάλλον της MATLAB, ένα για κάθε μια από τις παραμέτρους κατεργασίας που μας απασχολούν. Οι παράμετροι αυτές είναι η πίεσης τριβής F_r , η πίεσης σφυρηλάτησης U_r , ο χρόνος τριβής F_t , ο χρόνος σφυρηλάτησης U_t καθώς και ταχύτητα περιστροφής (rpm).

Κάθε ένα λοιπόν από αυτά τα 5 δίκτυα έχει ως στόχο την εξαγωγή της όσο το δυνατόν περισσότερο αποδεκτής συνθήκης κατεργασίας, οι οποίες θα αποτελέσουν και τις τελικές παραμέτρους της κατεργασίας. Πιο συγκεκριμένα κάθε ένα δίκτυο εκπαιδεύεται με ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων (inputs) τα οποία αντιστοιχίζονται κατάλληλα σε δεδομένα στόχους (targets). Έτσι, το δίκτυο μπορεί μετά την εκπαίδευση του να «καταλάβει» και να «δημιουργήσει» τις σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ δεδομένων εισόδου και εξόδου και εν τέλει να είναι σε θέση να προβλέψει αντίστοιχες τιμές εξόδου για εντελώς διαφορετικά και νέα δεδομένα.

Μέσα από περιβάλλον της MATLAB παρέχεται η δυνατότητα σχεδιασμού και ανάπτυξης κατάλληλων νευρωνικών δικτύων εύκολα και άμεσα από την εντολή `nnstart`. Η συγκεκριμένη εντολή οδηγεί σε ένα νέο παράθυρο στο οποίο υπάρχουν οι κύριες και περισσότερο χρησιμοποιούμενες κατηγορίες νευρωνικών δικτύων. Αυτές είναι η αναγνώριση μοτίβων (pattern recognition), η ομαδοποίηση (clustering), οι χρονοσειρές (time series), η προσαρμογή ή βελτιστοποίηση (fitting) κ.α. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας καθώς και λόγω της φύσης των δεδομένων, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η κατηγορία νευρωνικών δικτύων με παλινδρόμηση (regression analysis).

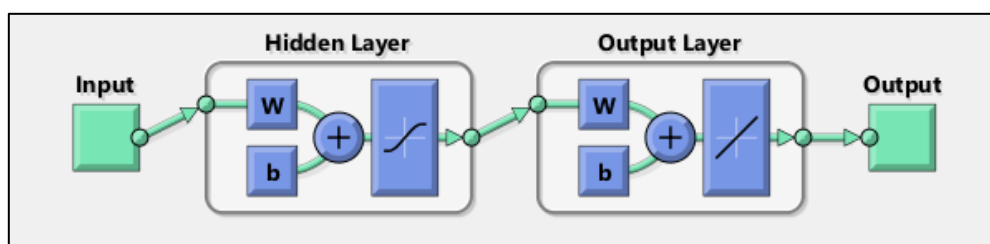
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) έχουν την ικανότητα να αναγνωρίζουν τις μη γραμμικές συναρτήσεις των εισόδων τους και έχουν την δυνατότητα να αντιπροσωπεύουν ένα μη γραμμικό σύστημα με την πλησιέστερη δυνατή προσέγγιση. Αποτελούνται από νευρώνες που αντιπροσωπεύουν μεταβλητές εισόδου και εξόδου καθώς και ενδιάμεσα στρώματα που διασυνδέονται μέσω βαρών. Η απόδοση τους εξαρτάται από τον τύπο του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται, τον αριθμό των νευρώνων στο κρυφό στρώμα, τον ρυθμό εκμάθησης και τον τύπο της συνάρτησης μέλους που υπονοείται. Διάφοροι παράγοντες που καθορίζουν την

απόδοση των νευρωνικών δικτύων είναι το μέσο τετράγωνο σφάλμα (MSE), ο αριθμός εποχών, ο χρόνος εκπαίδευσης, οι έλεγχοι επικύρωσης και η βαθμίδα.

6.1 Εισαγωγή στην ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων με regression

Για την επίλυση προβλημάτων προσαρμογής, απαιτείται η ανάπτυξη ενός νευρωνικού δικτύου το οποίο θα είναι ικανό να χαρτογραφήσει ένα σύνολο δεδομένων αριθμητικών εισόδων και ένα σύνολο αριθμητικών στόχων. Παραδείγματα αυτού του τύπου προβλημάτων περιλαμβάνουν την εκτίμηση των επιπέδων εκπομπών ενός κινητήρα με βάση τις μετρήσεις της κατανάλωσης καυσίμου και της ταχύτητας ή την πρόβλεψη του επιπέδου σωματικού λίπους ενός ασθενούς με βάση τις μετρήσεις σώματος.

Ένα δίκτυο τροφοδοσίας δύο επιπέδων με σιγμοειδείς συναρτήσεις μεταφοράς, κρυφούς νευρώνες και γραμμικούς νευρώνες εξόδου, μπορεί να ταιριάζει σε μεγάλο βαθμό προβλήματα πολυδιάστατης χαρτογράφησης, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ικανοποιητικός όγκος δεδομένων και σε αρκετοί νευρώνες ή/και επίπεδα στο κρυφό του στρώμα. Στην **Εικόνα 7** φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση ενός νευρωνικού δικτύου αυτής της κατηγορίας με τις τιμές εισόδου (inputs), το κρυφό επίπεδο (hidden layer), το φανερό επίπεδο (output layer) καθώς και τις τιμές εξόδου (output).

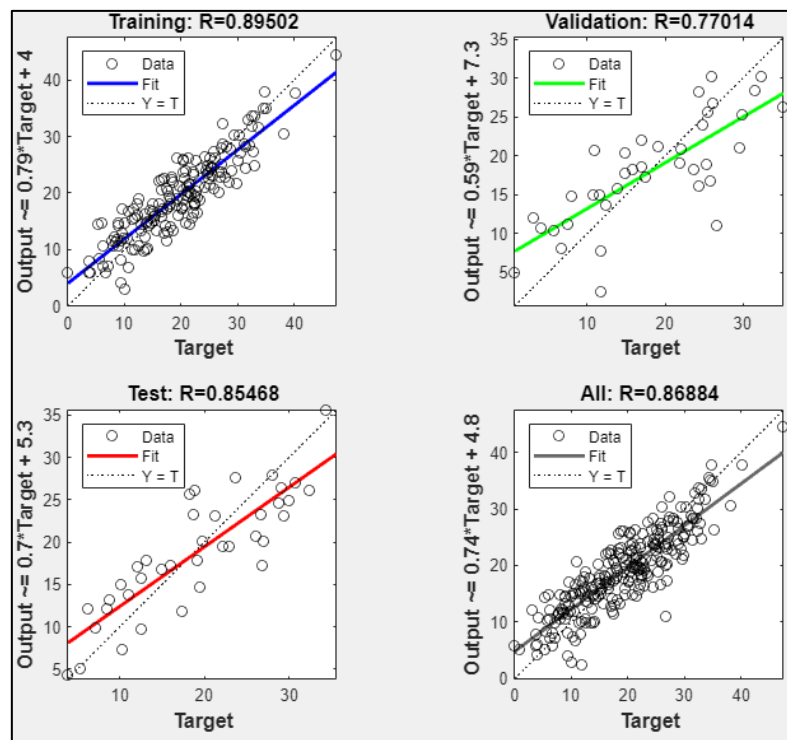


Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση τη δομής ενός νευρωνικού δικτύου της κατηγορίας regression.

Το νευρωνικό δίκτυο μέσα από υπολογισμούς σύμφωνα με διάφορους αλγορίθμους, όπως θα αναλυθούν στην συνέχεια, προσπαθεί να εκπαιδευτεί σύμφωνα με τα δεδομένα και τις τιμές εξόδου που του έχουν δοθεί. Η οπτικοποίηση της απόδοσης του διαφαίνεται από το διάγραμμα παλινδρόμησης, όπου εμφανίζονται οι προβλέψεις του δικτύου (output) σε σχέση με τις αποκρίσεις (targets) για τα σετ εκπαίδευσης, επικύρωσης και δοκιμής. Στόχος του είναι να πετύχει την καλύτερη δυνατή εφαρμογή, όπου τα δεδομένα θα πρέπει να «πέφτουν» κατά

μήκος μιας γραμμής με κλίση 45 μοιρών, υποδηλώνοντας ότι οι έξοδοι του δικτύου είναι ίσες με τις αποκρίσεις, όπως σχηματικά φαίνεται και στην **Εικόνα 8**.

Ορισμένοι αλγόριθμοι παρέχονται απευθείας από το σύστημα για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και είναι ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt (LM), η κανονικοποίηση Bayesian και η κλιμακώμενη διαβάθμιση συζυγούς. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ο αλγόριθμος LM καθώς συδυάζει την υψηλή ταχύτητα και την λιγότερη δέσμευση μνήμης.



Εικόνα 8. Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εκπαίδευσης (training), της επικύρωσης (validation) και της δοκιμής (test).

Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 για να λύσει προβλήματα μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Τα προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν στο πλαίσιο της προσαρμογής ενός παραμετροποιημένου μαθηματικού μοντέλου σε ένα σύνολο σημείων δεδομένων ελαχιστοποιώντας έναν στόχο που εκφράζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταξύ της συνάρτησης μοντέλου και ενός συνόλου σημείων δεδομένων. Εάν ένα μοντέλο είναι γραμμικό, ο στόχος των ελαχίστων τετραγώνων είναι τετραγωνικός. Εάν η συνάρτηση προσαρμογής δεν είναι γραμμική, το πρόβλημα των ελαχίστων τετραγώνων απαιτεί έναν αλγόριθμο επαναληπτικής λύσης. Τέτοιοι αλγόριθμοι μειώνουν το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταξύ της

συνάρτησης και των σημείων δεδομένων μέσω μιας ακολουθίας καλά επιλεγμένων ενημερώσεων στις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου. Η μέθοδος Levenberg-Marquardt λειτουργεί περισσότερο σαν μέθοδος κλίσης όταν οι παράμετροι απέχουν πολύ από τη βέλτιστη τιμή τους και λειτουργεί περισσότερο όπως Gauss-Newton όταν οι παράμετροι είναι κοντά στη βέλτιστη τιμή τους.

6.2 Περιγραφή της φιλοσοφίας και της λειτουργίας των νευρωνικών δικτύων

Για την καλύτερη και πιο ουσιαστική λειτουργία των νευρωνικών δικτύων, που αναπτύχθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας, είναι απαραίτητη η σκέψη και η φιλοσοφία του τρόπου λειτουργίας τους, των δεδομένων που διαχειρίζονται καθώς και άλλων παραγόντων προτού ακολουθήσει η ανάπτυξη και η υλοποίηση τους.

Ειδικότερα, τα δίκτυα που αναπτύχθηκαν αποφασίστηκε να δέχονται και να διαχειρίζονται δεδομένα υλικών τα οποία θα είναι αρκετά και συνάμα αντιπροσωπευτικά για το κάθε ένα. Έτσι, επιλέχθηκαν δεδομένα θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων των προς συγκόλληση υλικών τα οποία εισάγονται με την μορφή διανύσματος από τον χρήστη.

Τα δεδομένα αυτά είναι το μέτρο ελαστικότητας (GPa), το όριο διαρροής (MPa), η σκληρότητα (Vickers), η θερμική αγωγιμότητα [W/(mK)], η θερμοχωρητικότητα (J/g · K) και ο συντελεστής θερμικής διαστολής [(°C)⁻¹] για κάθε ένα από τα υλικά. Έτσι, αφού η συγκόλληση επιτυγχάνεται μεταξύ δύο, διαφορετικών ή και ίδιων, υλικών το δίκτυο απαιτεί από τον χρήστη να εισάγει τα δεδομένα αυτά με την μορφή διανύσματος 12x1 όπως αναπαρίσταται στην **Εικόνα 9** που ακολουθεί.

	60-45-15/AISI 321
μέτρο ελαστικότητας (GPa)	172
όριο διαρροής (MPa)	345
σκληρότητα (Vickers)	173
θερμική αγωγιμότητα [W/(mK)]	32,301
θερμοχωρητικότητα (J/g · K)	0,602
συντ. θερμικής διαστολής [(°C) ⁻¹]	11,5
μέτρο ελαστικότητας (GPa)	200
όριο διαρροής (MPa)	510
σκληρότητα (Vickers)	157
θερμική αγωγιμότητα [W/(mK)]	14
θερμοχωρητικότητα (J/g · K)	0,5
συντ. θερμικής διαστολής [(°C) ⁻¹]	16,7

Εικόνα 9. Δεδομένα εισαγωγής με την μορφή διανύσματος 12X1.

Το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση, την επικύρωση και τις δοκιμές των νευρωνικών δικτύων προέρχονται από 37 ζεύγη υλικών, διαφορετικών ή και ίδιων (αυτοφυής συγκόλληση). Τα 37 ζεύγη υλικών απέδωσαν συνολικά 74 διανύσματα δεδομένων καθότι μεταξύ ενός ζεύγους A-B τα δεδομένα μπορούν να εισαχθούν είτε με πρώτα εκείνα του A ή αντίστοιχα με εκείνα του B. Όμως, καθότι υπήρχαν και περιπτώσεις αυτοφυών συγκολλήσεων, η αναστροφή αυτή απέδιδε το ίδιο ακριβές διάνυσμα. Για αυτό τα ολόδια διανύσματα αφαιρέθηκαν προς αποφυγή σφαλμάτων κατά την εκπαίδευση των δικτύων. Τελικώς, το σύνολο των δεδομένων αποτελούνταν από 71 διανύσματα με 12 στοιχεία το καθένα, καθώς επίσης και από ένα 13^ο στοιχείο το οποίο αποτελούσε το δεδομένο στόχο με το οποίο αντιστοιχίζοταν το κάθε διάνυσμα. Με αυτόν τον τρόπο κάθε φορά σχηματιζόταν ένα μητρώο 13X71 το οποίο χωριζόταν κατάλληλα σε δεδομένα εκπαίδευσης, επικύρωσης, δοκιμών καθώς και δεδομένα στόχους (targets). Επίσης, έγιναν δοκιμές με την εισαγωγή της ακτίνας των προς συγκόλληση δοκιμών ώστε να επιτευχθεί περεταίρω διαφοροποίηση μεταξύ των δεδομένων εισόδου.

6.3 Ανάπτυξη κώδικα εκπαίδευσης στο MATLAB

Για την εκπαίδευση των 5 νευρωνικών δικτύων αναπτύχθηκε κώδικας στο λογισμικό MATLAB. Στην συνέχεια παρατίθεται στο σύνολο του ο βασικός κώδικας που χρησιμοποιήθηκε καθώς επίσης σημειώνονται και οι διάφορες τροποποιήσεις που εφαρμόστηκαν για κάθε ένα από τα δίκτυα. Έπειτα ακολουθεί η περιγραφή του νευρωνικού δικτύου.

```
%εισαγωγή δεδομένων
```

```
data= xx1;
```

```
%διαχωρισμός δεδομένων σε 80/10/10 training/validation/testing
```

```
training_input= data(1:12,1:57);
```

```
training_output= data(13,1:57);
```

```
validation_iput= data(1:12,58:64);
```

```
validation_output= data(13,58:64);
```

```
testing_input= data(1:12,65:71);
```

```
testing_output= data(13,65:71);
```

```
%δημιουργία νευρωνικών
```

```
for i=1:n2
```

```
    net{i} = feedforwardnet([φ3], 'trainlm');
```

%αρχικοποίηση βαρών

```
net{i} = init(net{i});
```

%παράμετροι εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου

```
net{i}.trainParam.epochs = 400;  
net{i}.trainParam.goal = 0;  
net{i}.trainParam.max_fail = 10;  
net{i}.trainParam.showWindow = true;  
net{i}.divideFcn = '';
```

%εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου

```
[net{i},tr{i}] = train(net{i},training_input,training_output);
```

```
ANN_response{i} = sim(net{i},training_input);
```

```
ANN_generalisation{i} = sim(net{i},testing_input);  
end
```

```
for j=1:n2  
gre{j} = (((ANN_generalisation{j}-testing_output)./testing_output)*100);  
gmre{j} = (sum(abs(gre{j}))/size(testing_output,2));  
end
```

```
for k=1:n2  
R_response{k} = corrcoef(training_output,ANN_response{k});  
R_generalisation{k} = corrcoef(testing_output,ANN_generalisation{k});  
end
```

%Find the best ANN index

```
gmre_ar = cell2mat(gmre)  
[minval,position] = min(gmre_ar)
```

```
%Display best ANN graphs  
%Plot the ANN response vs the training outputs for each output  
%ANN response is red cross  
%Training output is blue circle  
figure('Name','Training Performance','NumberTitle','off');  
subplot(2,1,1);  
plot(1:size(training_output,2),training_output(1,:),'bo',1:size(ANN_response{position},2),ANN  
N_response{position}(1,:),'r+');  
xlabel('Number of datapoint');  
ylabel('xx1');  
%title();  
legend('train outputs','ANN response');  
grid on;  
subplot(2,1,2); bar(1:size(training_output,2),((ANN_response{position}-  
training_output)./training_output)*100);
```

```

xlabel('Number of datapoint');
ylabel('Relative Error (%)');
%title();
legend('train outputs','ANN response');
grid on;

%Plot the linear regression between the ANN response vs the training
%outputs for each output
figure('Name','Training Regression','NumberTitle','off');
plotregression(training_output(1,:),ANN_response{position}(1,:));

%Plot the ANN generalization vs the testing outputs for each output
%ANN response is red cross
%Training output is blue circle
figure('Name','Generalization Performance','NumberTitle','off');
subplot(2,1,1);
plot(1:size(testing_output,2),testing_output(1,:),'bo',1:size(ANN_generalisation{position},2),
ANN_generalisation{position}(1,:),'r+');
xlabel('Number of datapoint');
ylabel('xx1');
%title();
legend('test outputs','ANN generalisation');
grid on;

subplot(2,1,2); bar(1:size(testing_output,2),((ANN_generalisation{position}-
testing_output)./testing_output)*100);
xlabel('Number of datapoint');
ylabel('Relative Error (%)');
%title();
legend('test outputs','ANN generalisation');
grid on;

%Plot the linear regression between the ANN generalisation vs the testing
%outputs for each output
figure('Name','Generalization Regression','NumberTitle','off');
plotregression(testing_output(1,:),ANN_generalisation{position}(1,:));

```

¹ xx: τα δεδομένα εισόδου/εξόδου για κάθε ένα από τα 5 νευρωνικά δίκτυα. fp: δεδομένα για πίεση τριβής, up: δεδομένα για πίεση σφυρηλάτησης, ft: δεδομένα για χρόνο τριβής, ut: δεδομένα για χρόνο σφυρηλάτησης και rpm: δεδομένα για ταχύτητα περιστροφής.

² n: οι επαναλήψεις που εφαρμόστηκαν για την εύρεση του πιο αποδεκτού νευρωνικού δικτύου.

³ φ: οι νευρώνες ανά κρυφό επίπεδο. Και στα πέντε δίκτυα χρησιμοποιήθηκε ένα κρυφό επίπεδο.

Σκοπός του κώδικα που αναπτύχθηκε ήταν οι συνεχείς επαναλήψεις, κατασκευές δικτύων, υπολογισμοί βαρών κ.α. με στόχο την εύρεση του δικτύου εκείνου το οποίο θα είχε το μικρότερο δυνατό σχετικό σφάλμα. Οι νευρώνες επιλέχθηκαν με γνώμονα την αποφυγή overfitting στο στάδιο της εκπαίδευσης, αλλά και της καλύτερης δυνατής απόκρισης τόσο του σταδίου της εκπαίδευσης όσο και της δοκιμής όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6 που ακολουθεί. Παράλληλα, έγιναν δοκιμές αντεπικύρωσης (cross validation) για την επικύρωση των μοντέλων και την αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να γενικευθούν σε ένα ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων.

Η αντεπικύρωση είναι μια μέθοδος επαναδειγματοληψίας που χρησιμοποιεί διαφορετικά τμήματα των δεδομένων για να δοκιμάσει και να εκπαιδεύσει ένα μοντέλο σε διαφορετικές επαναλήψεις. Χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα όπου στόχος είναι η πρόβλεψη και γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθεί πόσο ακριβές θα είναι ένα μοντέλο πρόβλεψης στην πράξη. Σε τέτοιου είδους προβλήματα δίνεται ένα σύνολο γνωστών δεδομένων στα οποία εκτελείται η εκπαίδευση και ένα σύνολο δεδομένων άγνωστων δεδομένων με τα οποία ελέγχεται το μοντέλο. Στόχος είναι να ελεγχθεί η ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει νέα δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμησή του, προκειμένου να επισημανθούν προβλήματα όπως το overfitting ή η μεροληψία επιλογής και να δοθεί μια εικόνα για το πώς το μοντέλο θα γενικευτεί σε ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων.

Η μέθοδος της cross-validation περιλαμβάνει τη διαίρεση ενός δείγματος δεδομένων σε υποσύνολα, την εκτέλεση της ανάλυσης σε ένα υποσύνολο (που ονομάζεται σύνολο εκπαίδευσης) και την επικύρωση της ανάλυσης στο άλλο υποσύνολο (που ονομάζεται σύνολο επικύρωσης ή σύνολο δοκιμών). Για να μειωθεί η μεταβλητότητα, στις περισσότερες μεθόδους εκτελούνται πολλαπλοί γύροι διασταυρούμενης επικύρωσης χρησιμοποιώντας διαφορετικά υποσύνολα και τα αποτελέσματα επικύρωσης συνδυάζονται στους κύκλους για να δώσουν μια εκτίμηση της προγνωστικής απόδοσης του μοντέλου. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος k-fold, στην οποία το σύνολο των δεδομένων χωρίζεται σε k υποσύνολα και κάθε φορά ένα από αυτά χρησιμοποιείται για την επικύρωση του μοντέλου ενώ τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται k φορές και η συνολική ακρίβεια προκύπτει από την σχέση (2).

$$E = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k E_i \quad (2)$$

Πίνακας 6. Ο αριθμός νευρώνων και επαναλήψεων που επιλέχθηκε για κάθε δίκτυο.

#	fp	up	ft	ut	rpm
νευρώνων	4	6	3	4	3
επαναλήψεων	50	50	50	50	50

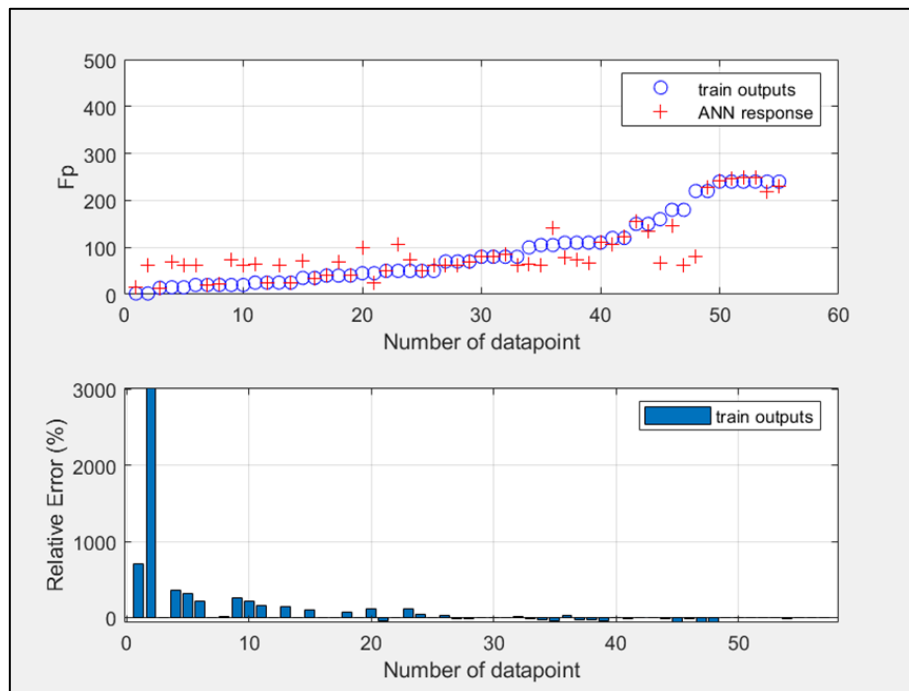
Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα - Συζήτηση

Με την ολοκλήρωση της ανάπτυξης των νευρωνικών δικτύων προέκυψαν κάποια αποτελέσματα σχετικά με την απόδοσή τους. Στην συνέχεια, αυτά παρατίθενται και σχολιάζονται μέσω εικόνων για κάθε δίκτυο ξεχωριστά. Για καλύτερα αποτελέσματα δοκιμάστηκαν δύο είδη δεδομένων. Πρώτα, εισήχθησαν τα 12 δεδομένα εισόδου που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ έπειτα έγινε προσθήκη της μέγιστης ακτίνας συγκόλλησης για κάθε ένα από τα δοκίμια/ζεύγη υλικών. Η προσθήκη αυτή έγινε διότι η πίεση για την συγκόλληση δεν είναι σταθερή σε όλη την επιφάνεια της συγκόλλησης, αλλά μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η απόσταση, κατά μήκος της ακτίνας, από τον άξονα περιστροφής. Ουσιαστικά, η επιθυμητές πιέσεις αποτελούν τις μέσες τιμές των αντίστοιχων πιέσεων, τριβής και σφυρηλάτησης, ούτως ώστε να επιτυγχάνονται οι επιθυμητές συνθήκες σέ ολόκληρη την επιφάνεια της διατομής των προς συγκόλληση δοκιμίων των διαφορετικών υλικών.

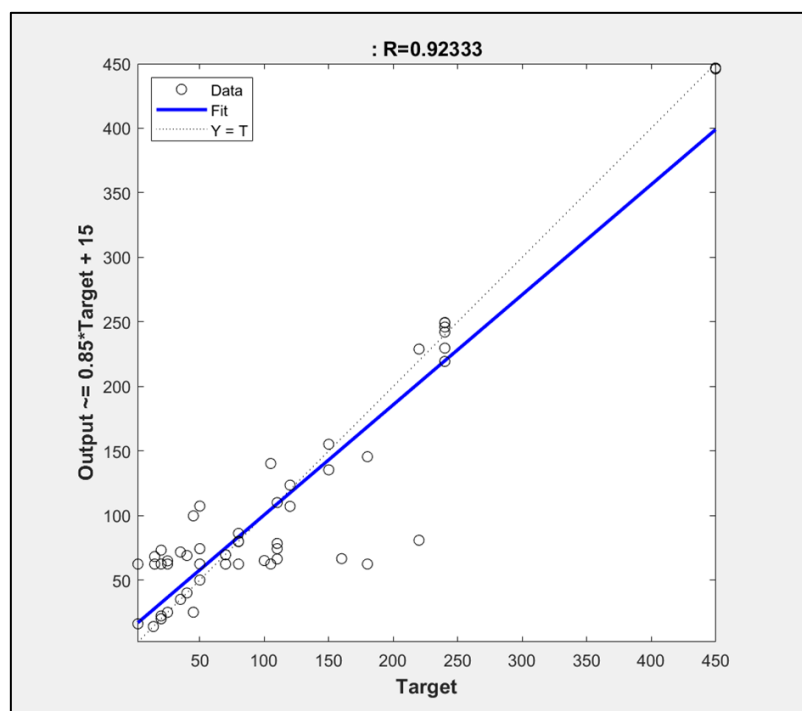
7.1 Αποτελέσματα για πίεση τριβής Fp

Το νευρωνικό δίκτυο που αναπτύχθηκε για το παρόν μέγεθος εκπαιδεύτηκε να αναγνωρίζει τα δεδομένα εισόδου του χρήστη και να τα κατανέμει κατάλληλα στην πίεση τριβής που είναι αναγκαία για την επίτευξη της συγκόλλησης. Παρακάτω παρατίθενται πρώτα τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης και της απόδοσης του δικτύου χωρίς την προσθήκη του δεδομένου της ακτίνας, ενώ στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετά την εισαγωγή της ακτίνας στο σύνολο των δεδομένων εισόδου. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται η απόδοση της εκπαίδευσης και των δοκιμών, καθώς επίσης και τα σχετικά διαγράμματα για το μέσο σχετικό σφάλμα και την συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα αντίστοιχα δεδομένα που παρατηρούνται ή προβλέπονται από το μοντέλο. Στις

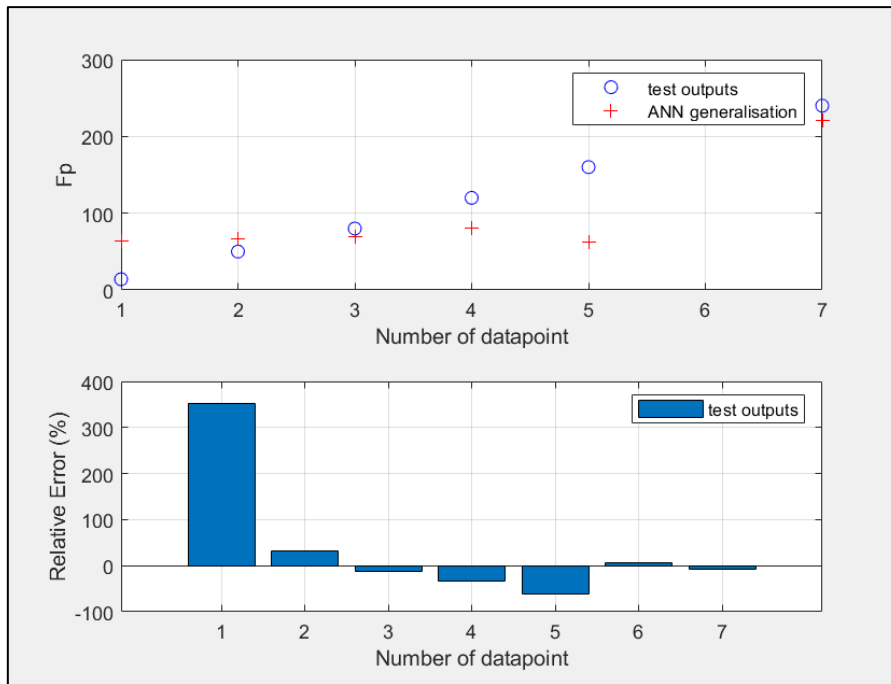
Εικόνες 10, 11, 12 και 13 παρατίθενται η απόδοση, το σχετικό σφάλμα (RE) και το R για την εκπαίδευση και τις δοκιμές αντίστοιχα, χωρίς την προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου.



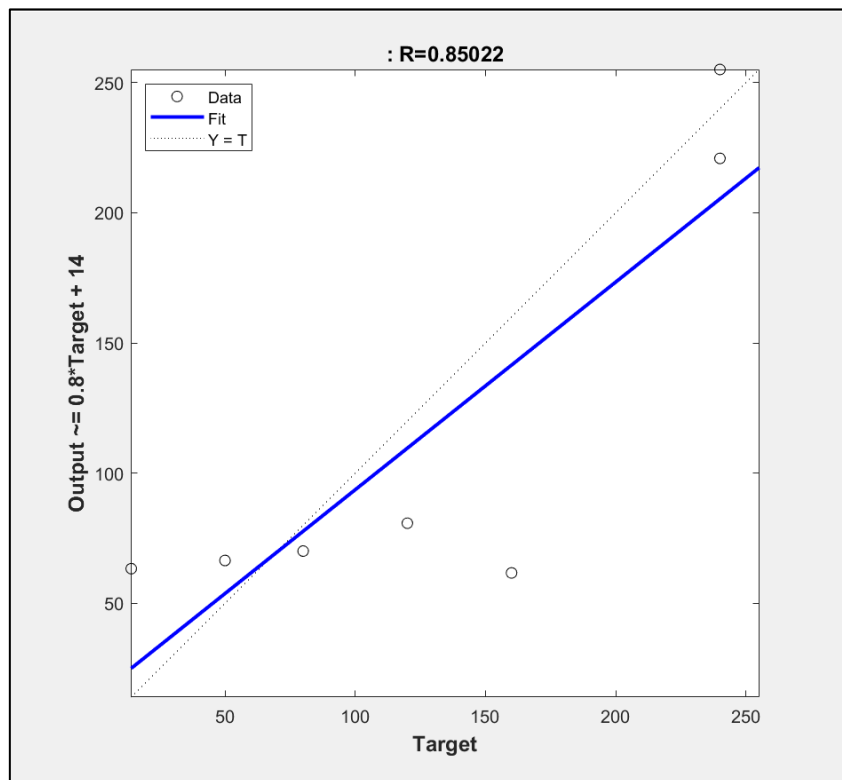
Εικόνα 10. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πίεση τριβής χωρίς την ακτίνα.



Εικόνα 11. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για την πίεση τριβής.



Εικόνα 12. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την πίεση τριβής χωρίς την ακτίνα.

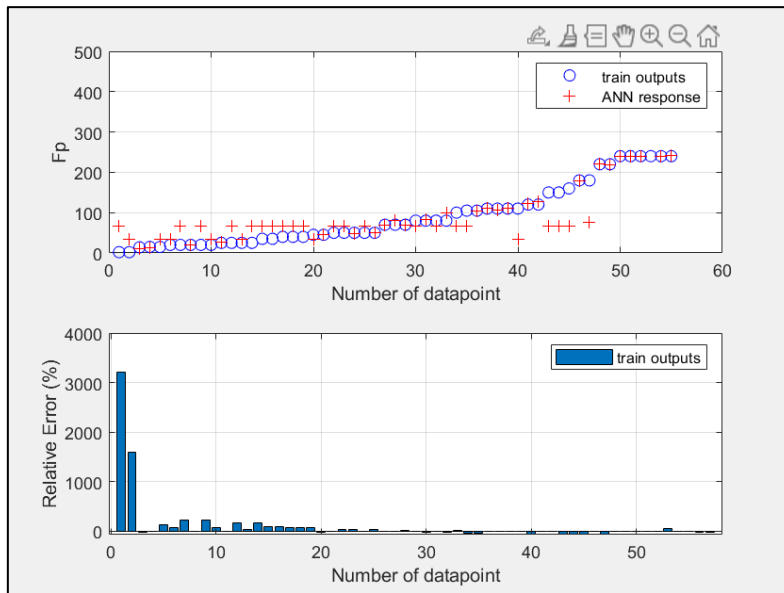


Εικόνα 13. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για την πίεση τριβής.

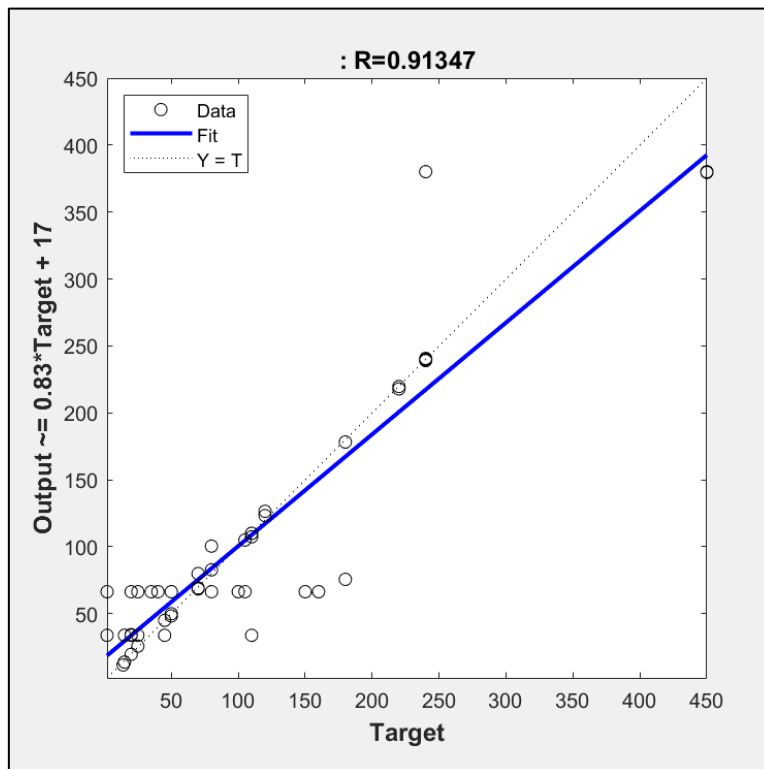
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, αν και περιγράφουν ένα σχετικά απλό νευρωνικό δίκτυο κατασκευασμένο με την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης, εντούτοις παρουσιάζουν σταθερά μια αρκετά μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δεδομένων στόχων και των προβλεπόμενων τιμών. Τα αποτελέσματα αυτά δεν μεταβάλλονταν προς κάποια καλύτερη οδό παρά τις πολλές και διαφορετικές αρχιτεκτονικές που εφαρμόστηκαν για την βελτίωση τους, οι οποίες περιλάμβαναν δοκιμές στον αριθμό των νευρώνων από 1 έως και 5 (στους 4 βρέθηκε το πιο αποδεκτό δίκτυο) διατηρώντας πάντα ένα κρυφό επίπεδο και δοκιμάζοντας πολλές επαναλήψεις για κάθε συνδυασμό. Για το παραπάνω δίκτυο το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι $1.4254e+03$, 24.4851 και αντίστοιχα $2.0851e+03$, 72.2832 για το testing

Πιο συγκεκριμένα, τα μεγαλύτερα σφάλματα εντοπίζονται στις ακραίες τιμές εκπαίδευσης και δοκιμής που εφαρμόστηκαν, παρά στο γενικότερο σύνολο των δεδομένων, γεγονός που θίγει την ακαταλληλότητα αλλά και το μέγεθος του όγκου των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Καθότι όμως έγιναν πολλαπλές και διαφορετικές προσεγγίσεις στον διαχωρισμό και την προεπεξεργασία των τιμών εισόδου, οδηγούμαστε στο αποτέλεσμα ότι ο κύριο παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση των νευρωνικών είναι ο μικρός όγκος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε.

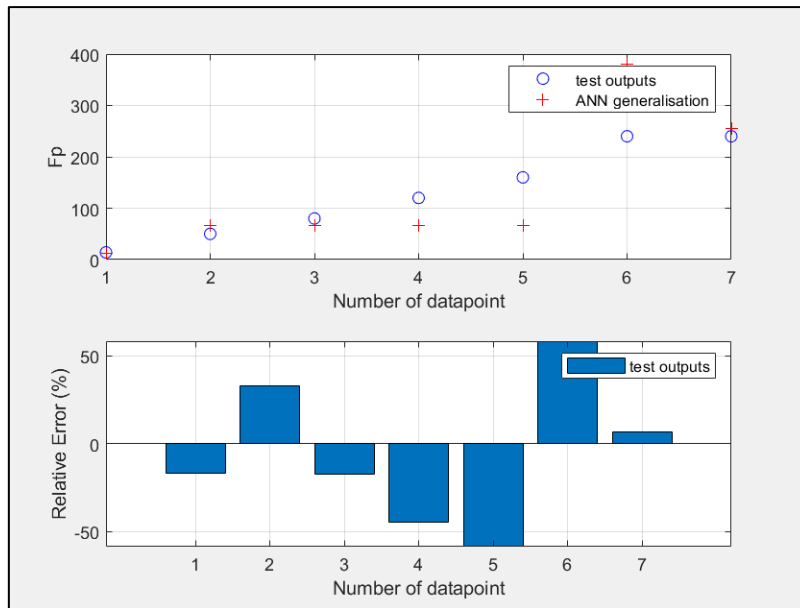
Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα του δικτύου για την τιμή της πίεσης τριβής, όταν στα δεδομένα εισόδου εφαρμόστηκε και το χαρακτηριστικό της ακτίνας της επιφάνειας συγκόλλησης. Να σημειωθεί ότι σε όλα τα υλικά που μελετήθηκαν, οι επιφάνειες της διατομής τους ήταν κυκλικές, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια συμπαγών υλικών χωρίς διαμήκη οπή στον κύριο όγκο τους. Στις **Εικόνες 14, 15, 16 και 17** παρατίθενται η απόδοση, το σχετικό σφάλμα και το R για την εκπαίδευση και τις δοκιμές αντίστοιχα, μετά την προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου. Και εδώ δοκιμάστηκαν διαφορετικές αρχιτεκτονικές για την βελτίωση των αποτελεσμάτων, με δοκιμές στον αριθμό των νευρώνων από 1 έως και 6 (στους 5 βρέθηκε το πιο αποδεκτό δίκτυο) διατηρώντας πάντα ένα κρυφό επίπεδο και δοκιμάζοντας πολλές επαναλήψεις για κάθε συνδυασμό. Για το δίκτυο αυτό, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι $1.6005e+03$, 52.6734 και αντίστοιχα $4.5696e+03$, 33.5612 για το testing



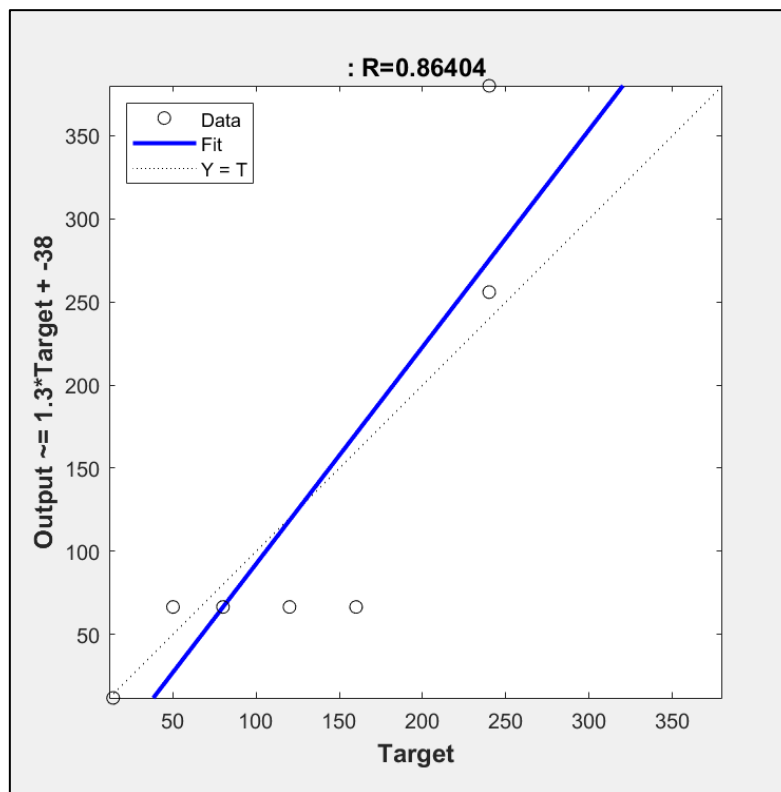
Εικόνα 14. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πίεση τριβής με την προθήκη της ακτίνας.



Εικόνα 15. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για την πίεση τριβής.



Εικόνα 16. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την πίεση τριβής με την προσθήκη της ακτίνας.



Εικόνα 17. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για την πίεση τριβής.

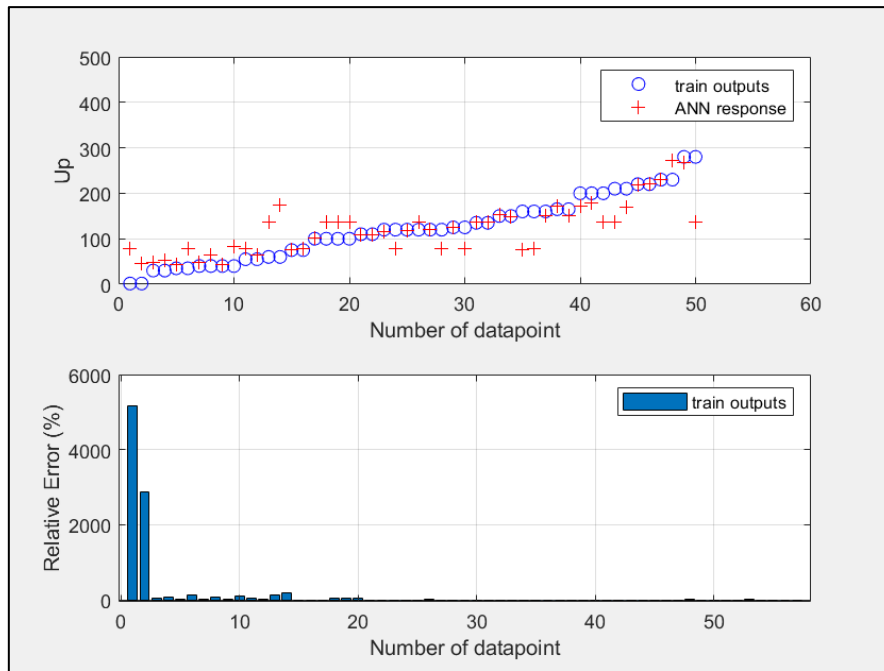
Από τις προηγούμενες εικόνες, όπου πλέον έχει εφαρμοστεί και η ακτίνα της διατομής της συγκόλλησης, παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερες μεταβολές παρά τις πολλαπλές

και διαφορετικές επαναλήψεις και αρχιτεκτονικές που εφαρμόστηκαν και στην συγκεκριμένη περίπτωση. Οι αποκλίσεις κινούνται στο ίδιο εύρος, γεγονός που οδηγεί στην εκτίμηση ότι η προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα του παρόντος νευρωνικού δικτύου δεν βελτιώνει αλλά ούτε και κάνει χειρότερα τα αποτελέσματα που προκύπτουν, παρά την συλλογιστική πορεία που είχε αναπτυχθεί σχετικά με την συσχέτιση ακτίνας και μέσης πίεσης που αναλύθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο.

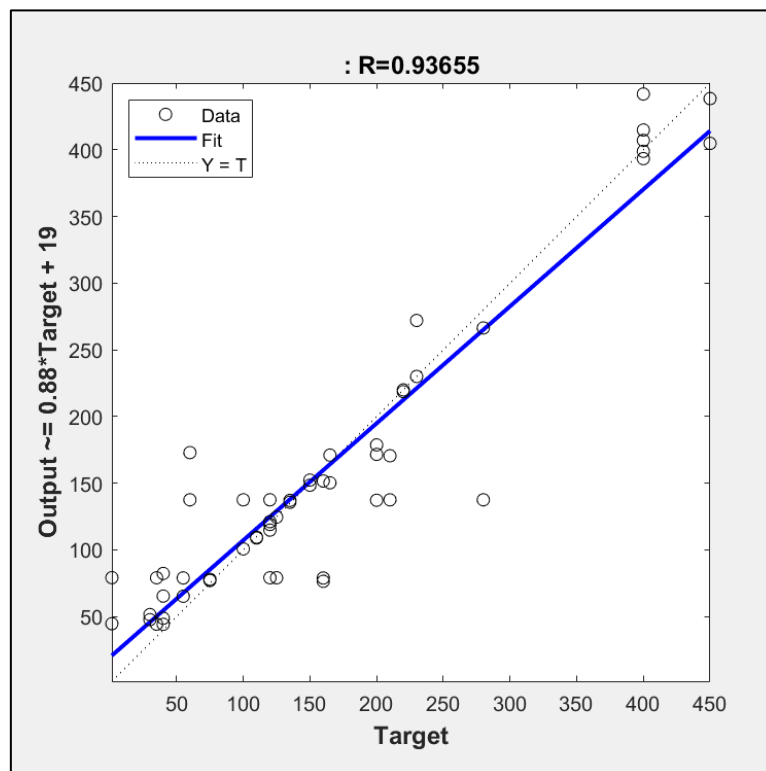
7.2 Αποτελέσματα για πίεση σφυρηλάτησης U_p

Για το συγκεκριμένο μέγεθος έγιναν επίσης πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις από την σκοπιά της αρχιτεκτονικής του νευρωνικού δικτύου, ώστε να μπορέσει μέσα από τα δεδομένα εισόδου να εκπαιδευτεί όσο το δυνατόν καλύτερα με σκοπό να μπορέσει να δίνει ως απάντηση την κατάλληλη πίεση σφυρηλάτησης για διαφορετικές εισόδους που θα του δίνονται από τον χρήστη. Και εδώ δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικά δεδομένα εισόδου αναφορικά με την ακτίνα της διατομής της συγκόλλησης όπου στα μεν δεν συμπεριελήφθη, ενώ στο δεύτερο πακέτο δεδομένων ήταν παρούσα. Ο αριθμός των διαφορετικών αρχιτεκτονικών ήταν ποικίλος (δοκιμάστηκαν 2 μέχρι 7 νευρώνες ανά επίπεδο, με σταθερά ένα κρυμμένο επίπεδο, με το καλύτερο αποτέλεσμα να προκύπτει για 6 νευρώνες) με στόχο την εύρεση εκείνου που θα έχει την καλύτερη δυνατή απόδοση τόσο για το κομμάτι της εκπαίδευσης του δικτύου, όσο και αναφορικά με τα αποτελέσματα που έδειχναν οι δοκιμές. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται η απόδοση της εκπαίδευσης και των δοκιμών, καθώς επίσης και τα σχετικά διαγράμματα για το μέσο σχετικό σφάλμα και την συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα αντίστοιχα δεδομένα που παρατηρούνται ή προβλέπονται από το μοντέλο. Για το δίκτυο χωρίς την ακτίνα, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι $1.6684e+03$, 202.3537 και αντίστοιχα $6.0059e+03$, 57.1077 για το testing.

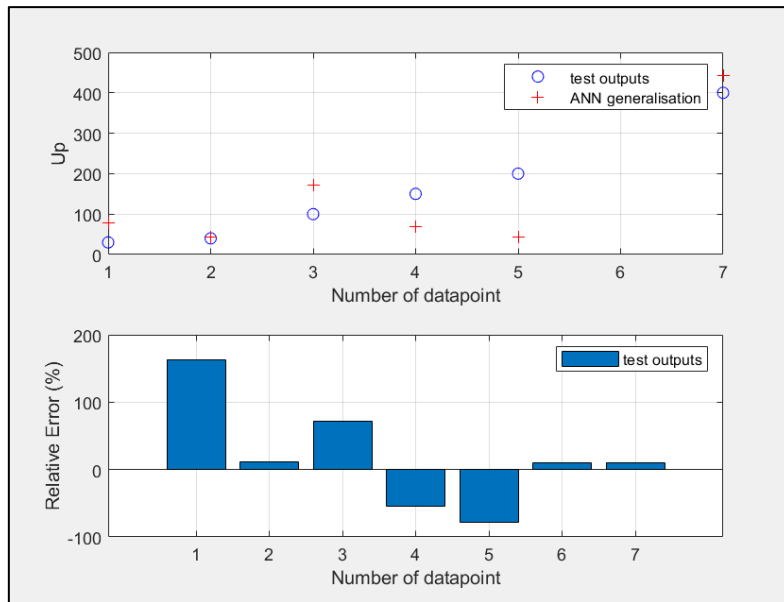
Στις **Εικόνες 18, 19, 20** και **21** παρατίθενται η απόδοση, το σχετικό σφάλμα και το R για την εκπαίδευση και τις δοκιμές αντίστοιχα, χωρίς την προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου, ενώ στις **Εικόνες 22, 23, 24** και **25** παρατίθενται τα ίδια μεγέθη μετά την προσθήκη της ακτίνας.



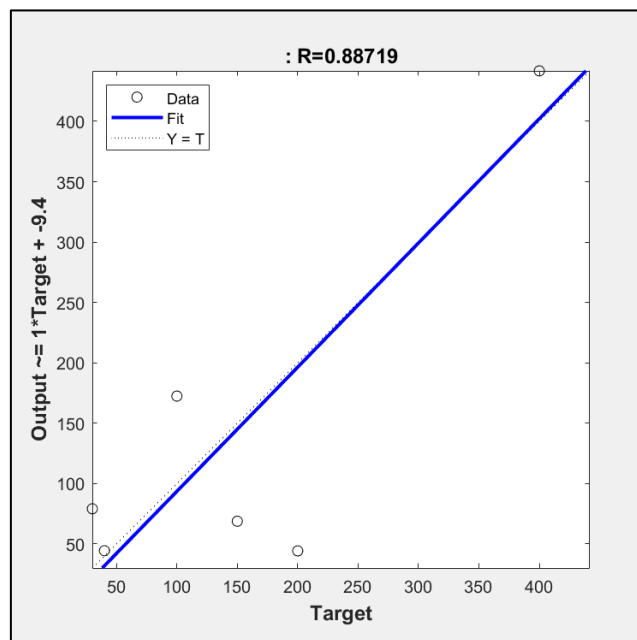
Εικόνα 18. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πίεση σφυρηλάτησης χωρίς την ακτίνα.



Εικόνα 19. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για την πίεση σφυρηλάτησης.



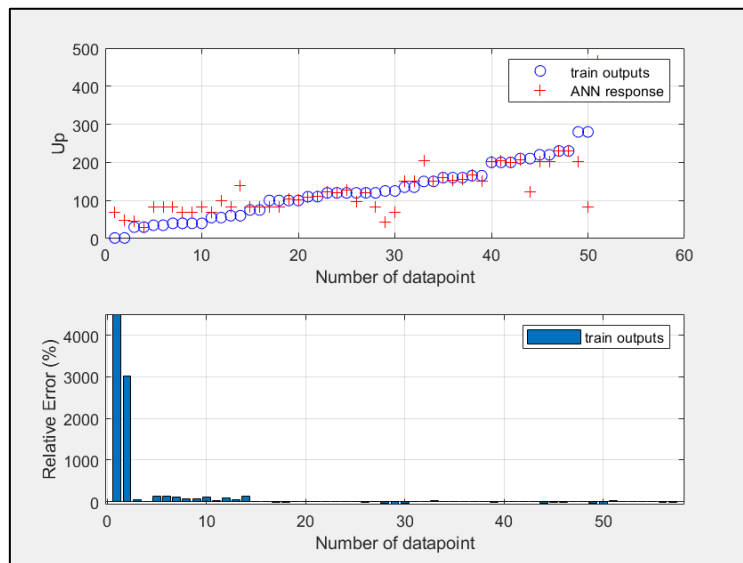
Εικόνα 20. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την πίεση σφυρηλάτησης χωρίς την ακτίνα.



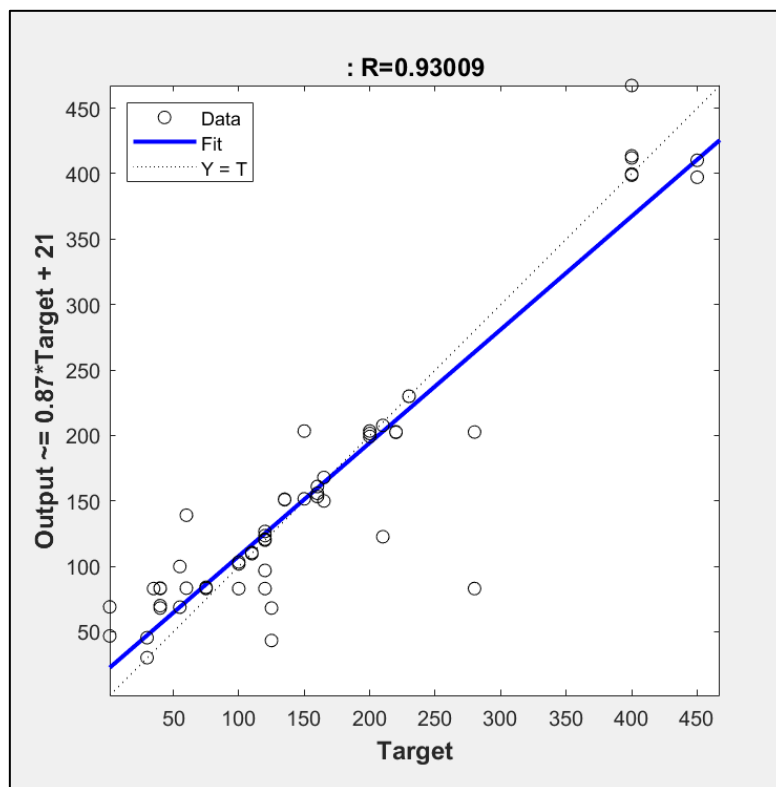
Εικόνα 21. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για την πίεση σφυρηλάτησης.

Για το παρόν δίκτυο τα αποτελέσματα φαίνονται σχετικά βελτιωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα του δικτύου για την πίεση τριβής. Και σε αυτή την περίπτωση όμως παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγάλα σφάλματα που όπως και πριν οφείλονται στον μικρό όγκο δεδομένων που διαχειρίζεται το δίκτυο κατά την εκπαίδευση και την δοκιμή. Αυτό προκύπτει από το γεγονός

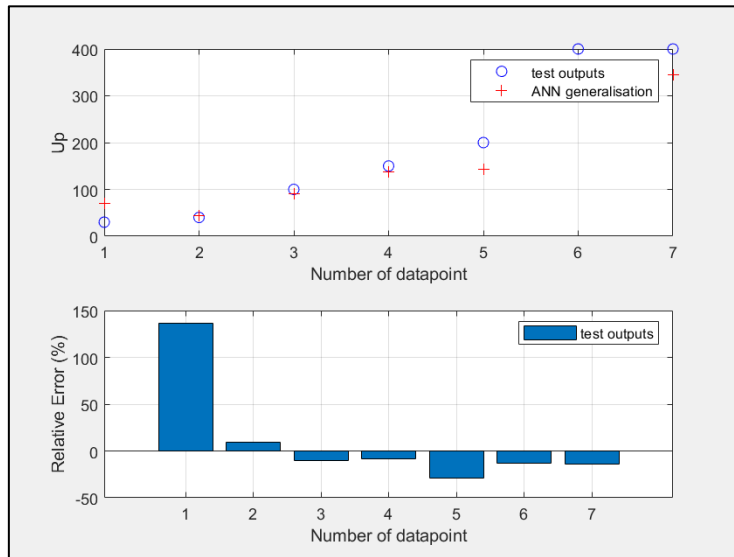
ότι για την επιλογή του παρόντος δικτύου πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές και αλλαγές στην αρχιτεκτονική και τον διαχωρισμό των δεδομένων.



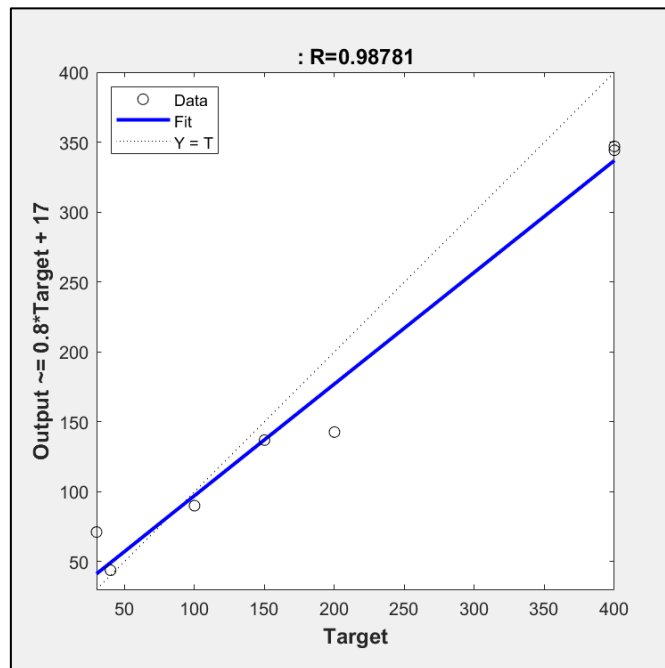
Εικόνα 22. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πίεση σφυρηλάτησης με την προθήκη της ακτίνας.



Εικόνα 23. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για την πίεση σφυρηλάτησης.



Εικόνα 24. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την πίεση σφυρηλάτησης με την προσθήκη της ακτίνας.



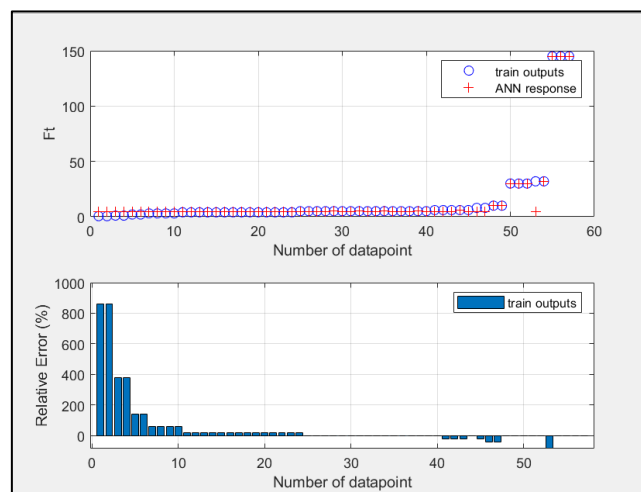
Εικόνα 25. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για την πίεση σφυρηλάτησης.

Σε αυτήν την περίπτωση τα αποτελέσματα εμφανίζονται ελαφρώς βελτιωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα της πίεσης σφυρηλάτησης χωρίς την εφαρμογή της ακτίνας, κυρίως στο κομμάτι των δοκιμών όπου το R από 0.88 άγγιξε το 0.98. Και εδώ όμως είναι εμφανές ότι το μοντέλο χρήζει βελτίωσης με την προσθήκη περισσότερων δεδομένων εκπαίδευσης. Το

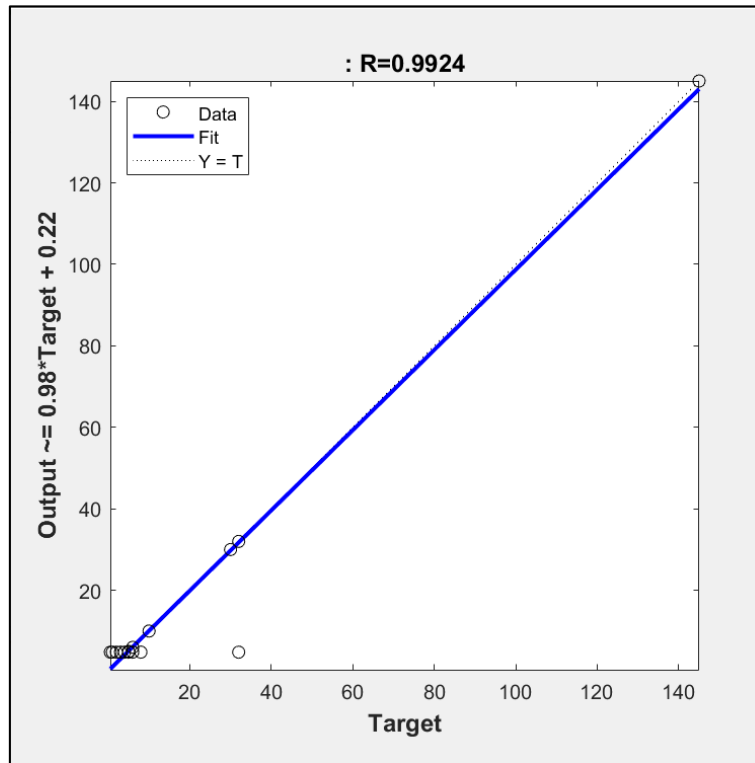
αποτέλεσμα όμως σε αυτό το δίκτυο δείχνει ότι η εφαρμογή της ακτίνας στην πίεσης σφυρηλάτησης έχει σημασία καθώς οδηγεί σε μια βελτίωση που συνάδει με την θεωρία και άρα θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν για μελλοντικά δίκτυα τέτοιου τύπου. Ο αριθμός των διαφορετικών αρχιτεκτονικών που δοκιμάστηκαν ήταν ικανοποιητικός καθώς δοκιμάστηκαν 2 μέχρι 6 νευρώνες ανά επίπεδο, με σταθερά ένα κρυμμένο επίπεδο, με το καλύτερο αποτέλεσμα να προκύπτει για 5 νευρώνες. Για το δίκτυο με την ακτίνα, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι $1.5281e+03$, 77.5161 και αντίστοιχα $8.5192e+03$, 58.3251 για το testing

7.3 Αποτελέσματα για τον χρόνο τριβής

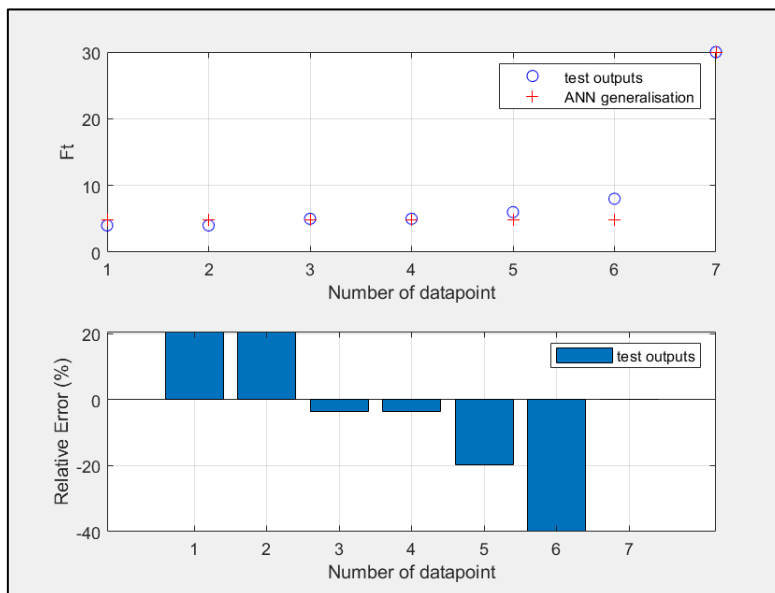
Στο παρόν υποκεφάλαιο αναλύεται η ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων, ικανών να αποδίδουν τιμές σχετικά με τον απαιτούμενο χρόνο τριβής που θα πρέπει να εφαρμόζεται για την επίτευξη συγκόλλησης διαφορετικών υλικών. Όπως και προηγουμένως, έτσι και σε αυτή την περίπτωση έγιναν δοκιμές τόσο με, όσο και χωρίς την προσθήκη της ακτίνας της διατομής συγκόλλησης για εύρεση των καλύτερων δεδομένων εισόδου. Από τα πολλαπλά δίκτυα που δοκιμάστηκαν αλλάζοντας τον αριθμό των νευρώνων στο ένα κρυφό επίπεδο από 2 μέχρι και 7, αυτό με καλύτερα αποτελέσματα βρέθηκε στους 3 νευρώνες και παρατίθεται στην συνέχεια. Για το δίκτυο χωρίς την ακτίνα, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι 0.3964 , 77.5161 και αντίστοιχα 1.8525 , 15.4238 για το testing. Στις **Εικόνες 26, 27, 28 και 29** παρατίθενται η απόδοση, το σχετικό σφάλμα και το R για την εκπαίδευση και τις δοκιμές αντίστοιχα, χωρίς την προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου.



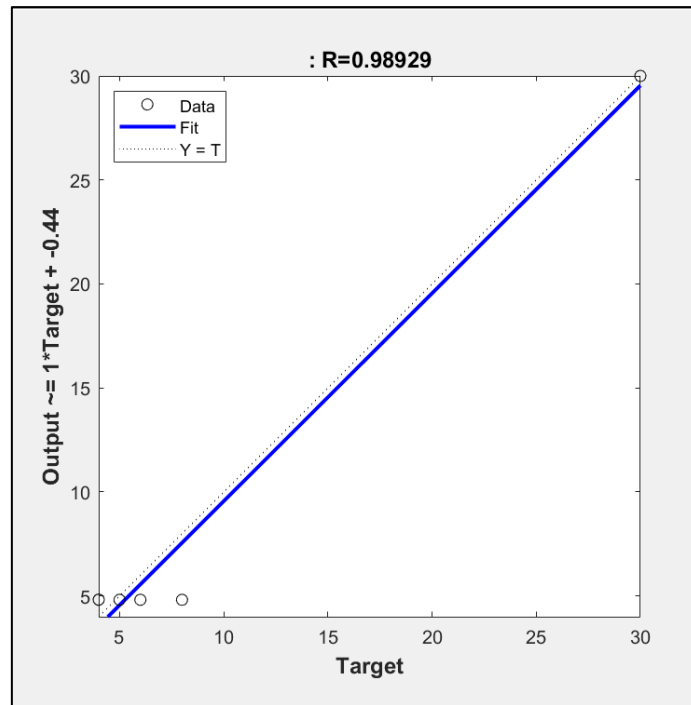
Εικόνα 26. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο τριβής χωρίς την ακτίνα.



Εικόνα 27. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για τον χρόνο τριβής.

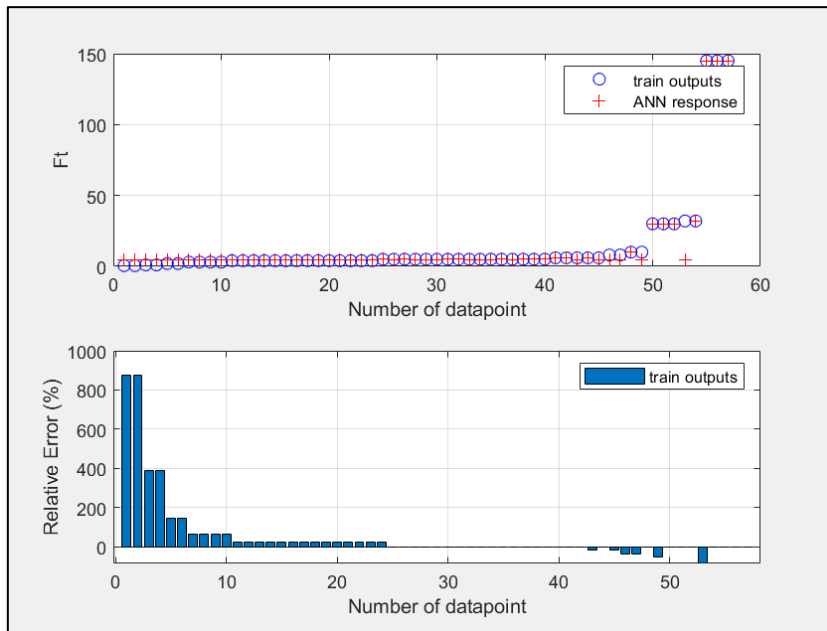


Εικόνα 28. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο τριβής χωρίς την ακτίνα.

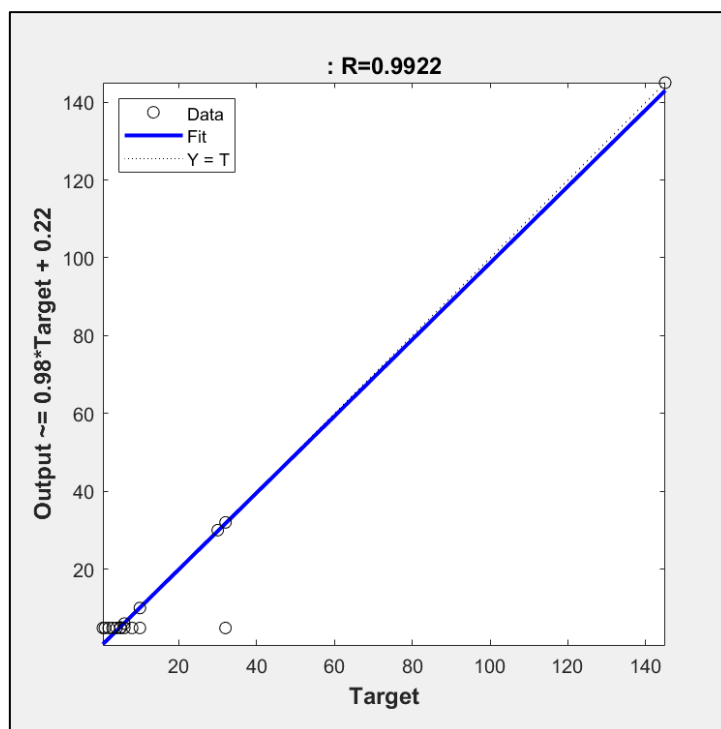


Εικόνα 29. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για τον χρόνο τριβής.

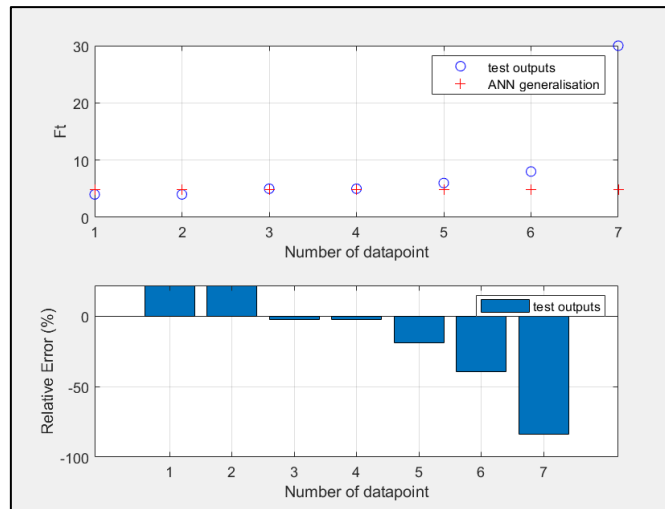
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον χρόνο τριβής φαίνονται ιδιαίτερα καλά, με τα σφάλματα να είναι αρκετά περιορισμένα σε σχέση με όλα τα προηγούμενα νευρωνικά δίκτυα που αναπτύχθηκαν για τα άλλα μεγέθη. Στην αντίστοιχες περιπτώσεις όμως, υπάρχει ο κίνδυνος τα δεδομένα να έχουν υποστεί overfitting, δηλαδή το νευρωνικό να μάθει αυτά και μόνο τα συγκεκριμένα δεδομένα χωρίς να μπορεί να αναπαράγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Από τα διάφορα δίκτυα που δοκιμάστηκαν αλλάζοντας τον αριθμό των νευρώνων στο ένα κρυφό επίπεδο από 2 μέχρι και 5, αυτό με καλύτερα αποτελέσματα βρέθηκε στους 3 νευρώνες. Για το δίκτυο με την ακτίνα, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι 0.3964, 77.5161 και αντίστοιχα 1.8525, 15.4238 για το testing. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την πρόσθεση των ακτινών στα δεδομένα εισόδου του νευρωνικού. Στις **Εικόνες 30, 31, 32** και **33** παρατίθενται η απόδοση, το σχετικό σφάλμα και το R για την εκπαίδευση και τις δοκιμές αντίστοιχα, μετά την προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου.



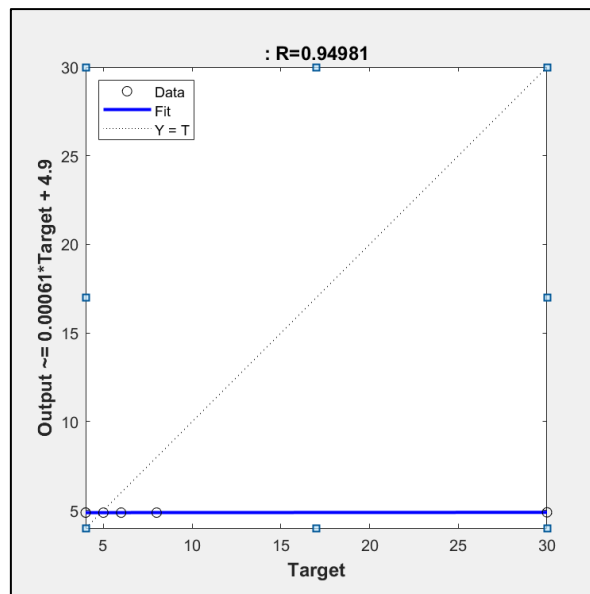
Εικόνα 30. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο τριβής με την προθήκη της ακτίνας.



Εικόνα 31. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για τον χρόνο τριβής.



Εικόνα 32. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο τριβής με την προσθήκη της ακτίνας.



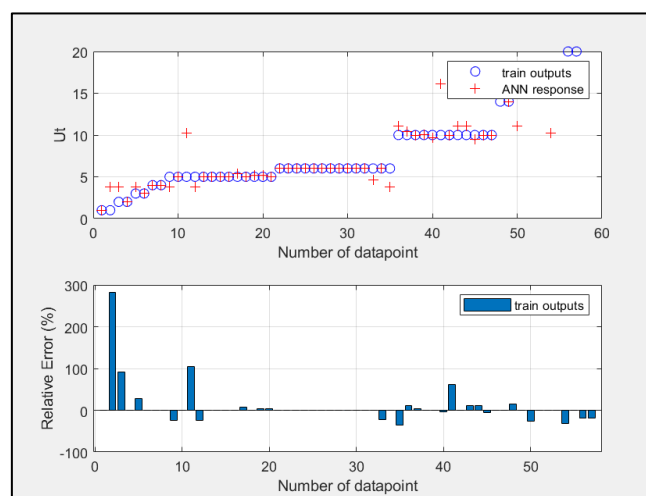
Εικόνα 33. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για τον χρόνο τριβής.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου φαίνονται ιδιαίτερα αντιφατικά σε σχέση με πριν, όπου δεν είχε συμπεριληφθεί. Χαρακτηριστικό είναι και εδώ ότι οι ακραίες τιμές παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλη απόκλιση παρά το καλό training που παρουσιάζεται, όπως και σε προηγούμενα δίκτυα. Από τα διάφορα δίκτυα που δοκιμάστηκαν, αυτό με καλύτερα αποτελέσματα βρέθηκε στους 3 νευρώνες. Για το δίκτυο με την ακτίνα, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι 12.0787, 27.6154 και αντίστοιχα 88.8334, 27.6424 για το testing. Επίσης, βλέποντας την **Εικόνα 33**, όπου παρουσιάζεται το R για το testing φαίνεται αρκετά υψηλό αλλά

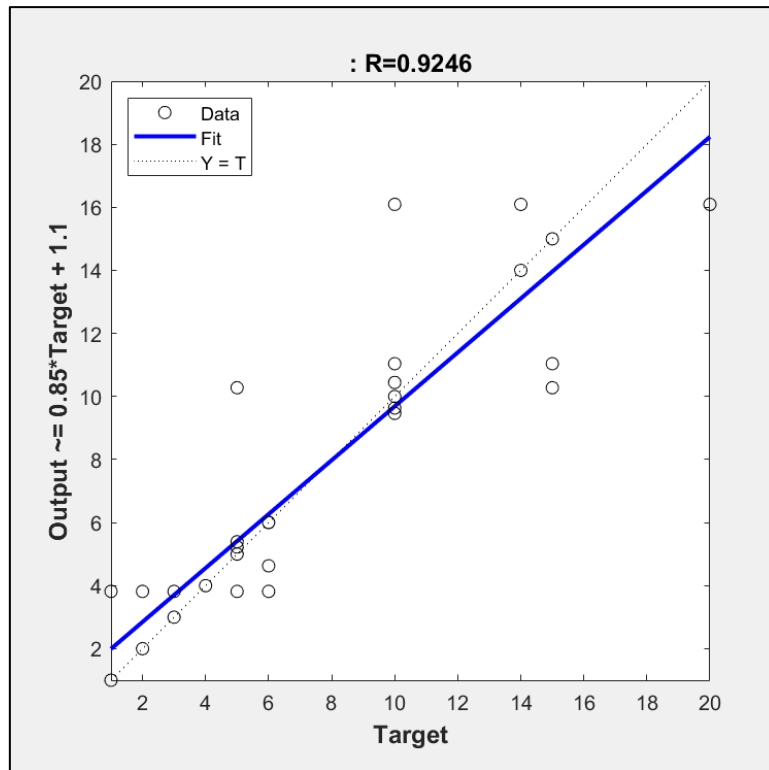
τα γράφημα δείχνει κάτι εντελώς διαφορετικό. Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι πέραν των λιγοστών δεδομένων που εφαρμόστηκαν, δεν σχετίζεται η ακτίνα της διατομής της επιφάνειας συγκόλλησης με τον χρόνο τριβής αλλά με τις πιέσεις όπως και προηγουμένως είχε φανεί. Να επισημανθεί ότι το γραφικό δεν αποτελεί προϊόν λάθους του λογισμικού, καθότι λόγω της ιδιαίτερης μορφής του, έγιναν επιπλέον δοκιμές για την επίτευξη καλύτερων και πιο λογικών αποτελεσμάτων, αλλά το αποτέλεσμα δεν μεταβαλλόταν.

7.4 Αποτελέσματα για τον χρόνο σφυρηλάτησης

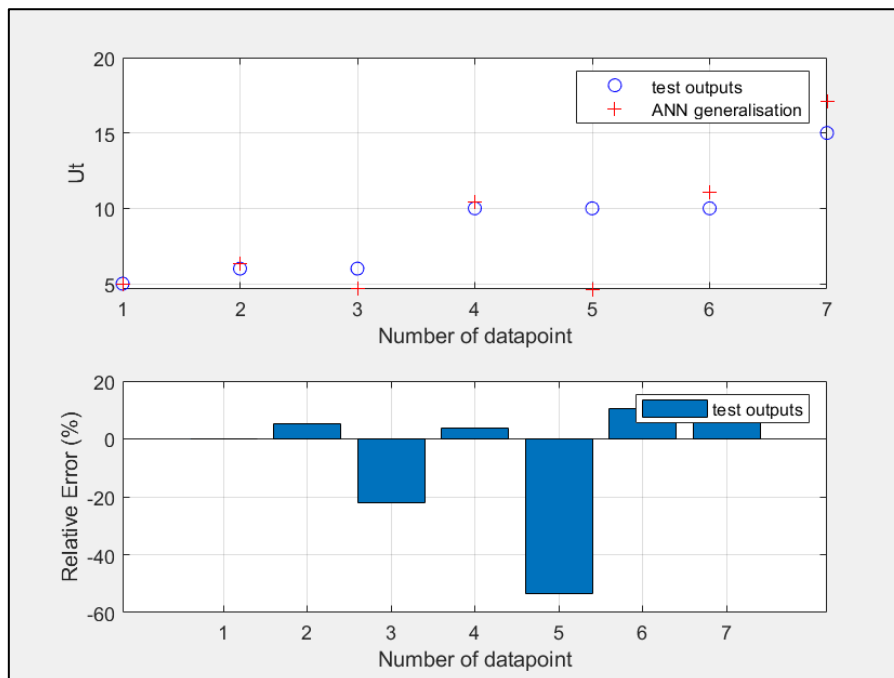
Όπως και στα προηγούμενα δίκτυα, έτσι και σε αυτό, η φιλοσοφία παρέμεινε η ίδια. Αναπτύχθηκαν πολλά και διαφορετικά δίκτυα με διάφορες αρχιτεκτονικές για την εύρεση εκείνου που με κατάλληλη εκπαίδευση θα έδινε ως αποτέλεσμα την τιμή του χρόνου σφυρηλάτησης για την επίτευξη της συγκόλλησης μεταξύ διαφορετικών υλικών. Τα δεδομένα εισόδου την μια φορά ήταν χωρίς την ακτίνα της διατομής της συγκόλλησης, ενώ την δεύτερη φορά συμπεριλήφθηκε. Από τα διάφορα δίκτυα που δοκιμάστηκαν, αυτό με καλύτερα αποτελέσματα βρέθηκε στους 4 νευρώνες. Για το δίκτυο χωρίς την ακτίνα, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι 2.8656, 16.8116 και αντίστοιχα 5.1872, 15.6526 για το testing. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και για τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζονται στην συνέχεια. Στις **Εικόνες 34, 35, 36** και **37** παρατίθενται η απόδοση, το σχετικό σφάλμα και το R για την εκπαίδευση και τις δοκιμές αντίστοιχα, χωρίς την προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου, ενώ στις **Εικόνες 38, 39, 40** και **41** παρατίθενται τα αντίστοιχα μεγέθη, μετά την προσθήκη της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου.



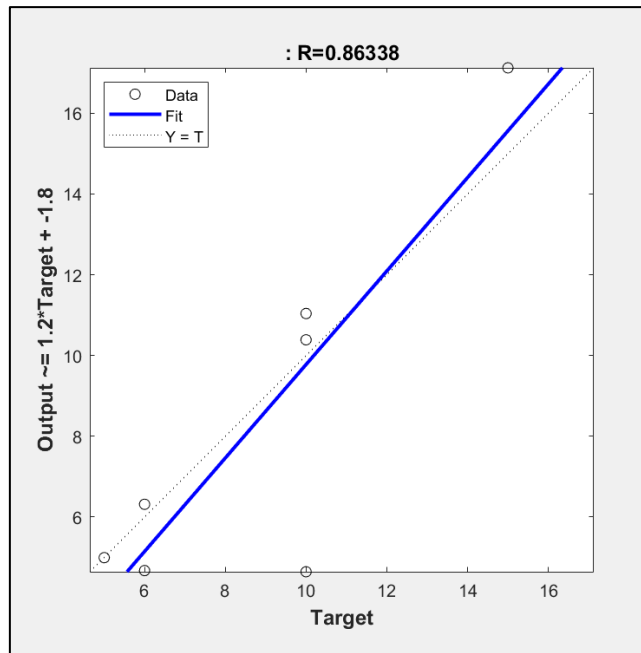
Εικόνα 34. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο σφυρηλάτησης χωρίς την ακτίνα.



Εικόνα 35. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για τον χρόνο σφυρηλάτησης.

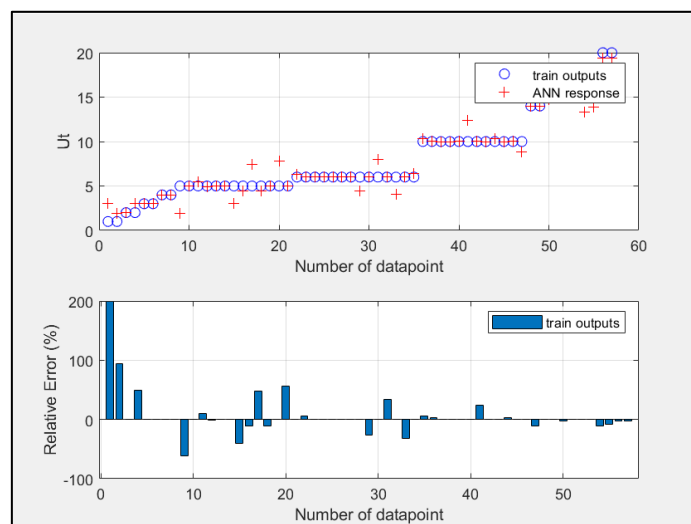


Εικόνα 36. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο σφυρηλάτησης χωρίς την ακτίνα.

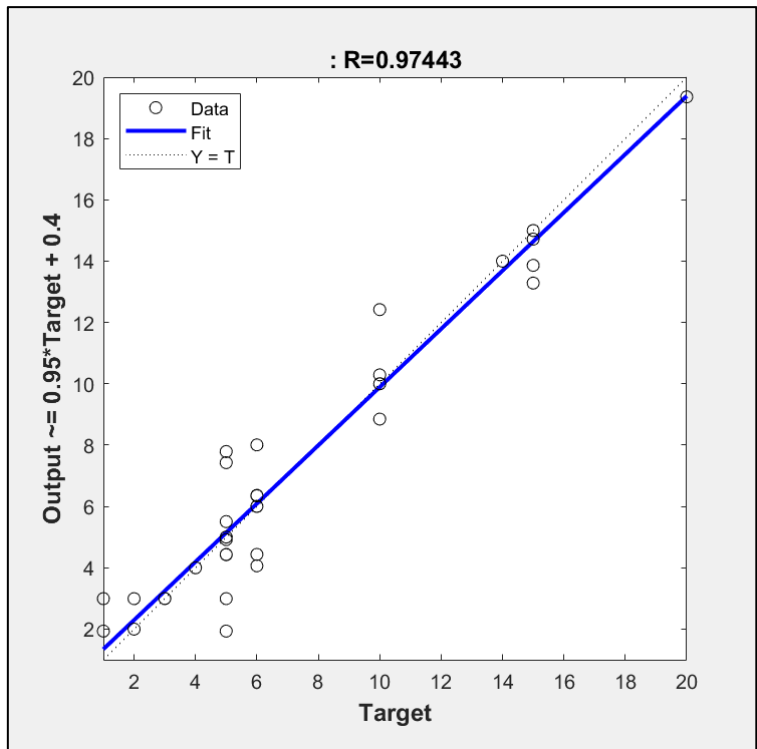


Εικόνα 37. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για τον χρόνο σφυρηλάτησης.

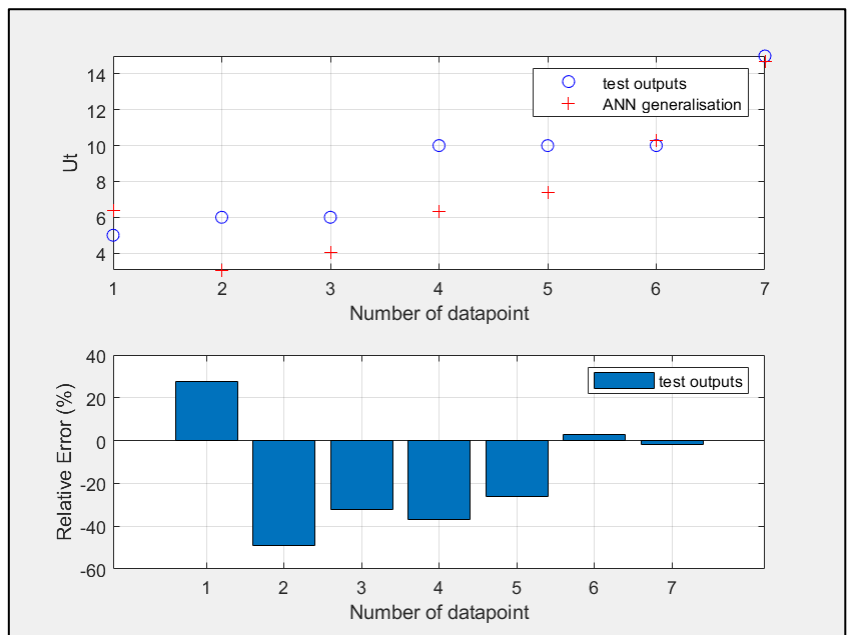
Τα αποτελέσματα για τον χρόνο σφυρηλάτησης φαίνονται ιδιαίτερα καλά μα σχετικά περιορισμένα σφάλματα τόσο για το training όσο και για το testing, ενώ επίσης και τα R που παρατηρούνται φαίνονται ιδιαίτερα ελπιδοφόρα καθώς έχουν σχεδόν τέλεια κλίση, χωρίς κίνδυνο overfitting και με υψηλό σκορ κοντά στην μονάδα. Και εδώ τα δεδομένα που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκλιση είναι οι ακραίες τιμές στα δεδομένα εκπαίδευσης, ενώ στο testing μονάχα ένα δεδομένο δείχνει ιδιαίτερη απόκλιση.



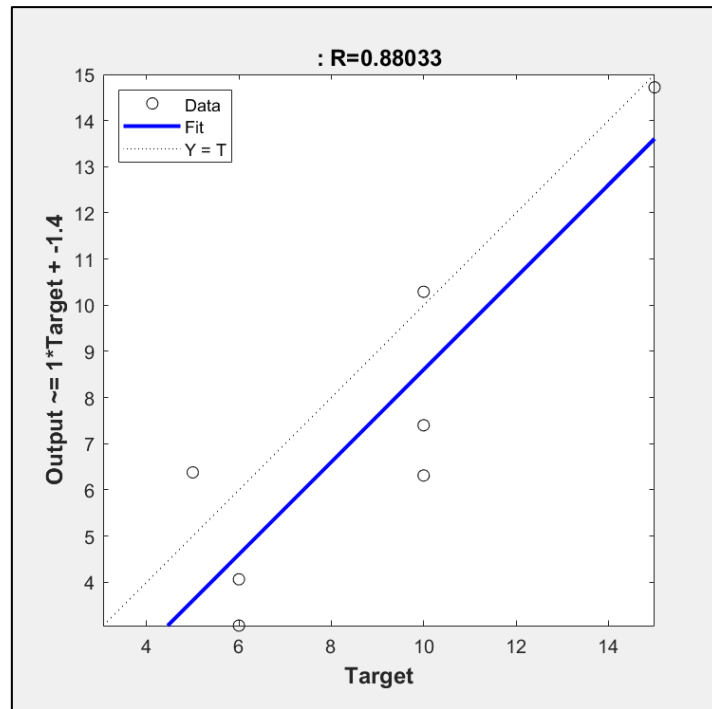
Εικόνα 38. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο σφυρηλάτησης με την προθήκη της ακτίνας.



Εικόνα 39. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για τον χρόνο σφυρηλάτησης.



Εικόνα 40. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για τον χρόνο σφυρηλασίας με την προσθήκη της ακτίνας.



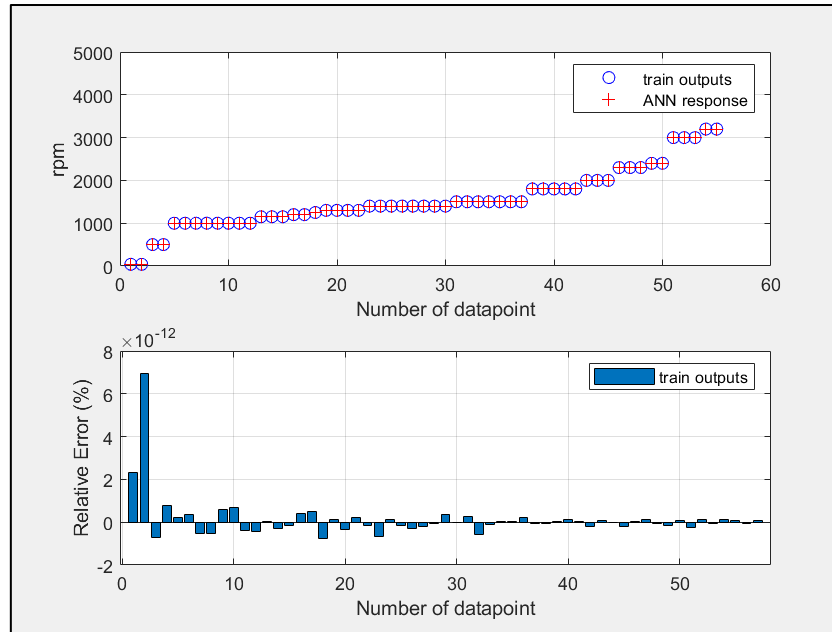
Εικόνα 41. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για τον χρόνο σφυρηλασίας.

Και σε αυτή την περίπτωση νευρωνικού δικτύου, που σχετίζεται με ένα μέγεθος χρόνου παρατηρούνται χειρότερα αποτελέσματα μετά την προσθήκη της ακτίνας της διατομής της επιφάνειας συγκόλλησης. Από τα διάφορα δίκτυα που δοκιμάστηκαν, αυτό με καλύτερα αποτελέσματα βρέθηκε στους 5 νευρώνες. Για το δίκτυο με την ακτίνα, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι 2.0638, 17.1889 και αντίστοιχα 9.7264, 27.3108 για το testing. Αυτό το γεγονός μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ακτίνα δεν σχετίζεται με κανέναν από τους δύο μελετώμενους χρόνους, ενώ αντιθέτως οδηγεί σε μεγαλύτερες αποκλίσεις από ότι πριν την εφαρμογή της. Και αυτό το συμπέρασμα συνάδει απόλυτα με την θεώρηση μας σχετικά με την εξάρτηση των πιέσεων από την μέγιστη ακτίνα της διατομής στην επιφάνεια συγκόλλησης.

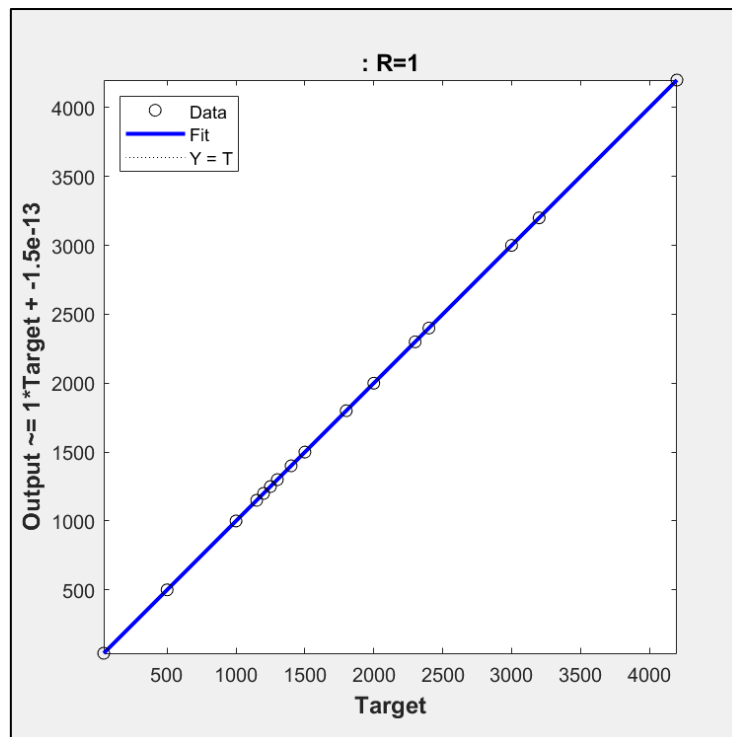
7.5 Αποτελέσματα για ταχύτητα περιστροφής rpm

Το τελευταίο νευρωνικό δίκτυο που αναπτύχθηκε σχετιζόταν με την ταχύτητα περιστροφής του chuck κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Το δίκτυο αναπτύχθηκε με την φιλοσοφία του να επιστρέφει την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής (rpm) για δεδομένα που δίνονται από τον χρήστη, σύμφωνα με την εκπαίδευση που έχει προηγηθεί. Και εδώ δοκιμάστηκε το διπλό μοτίβο δεδομένων, με και χωρίς ακτίνα διατομής και τα αποτελέσματα

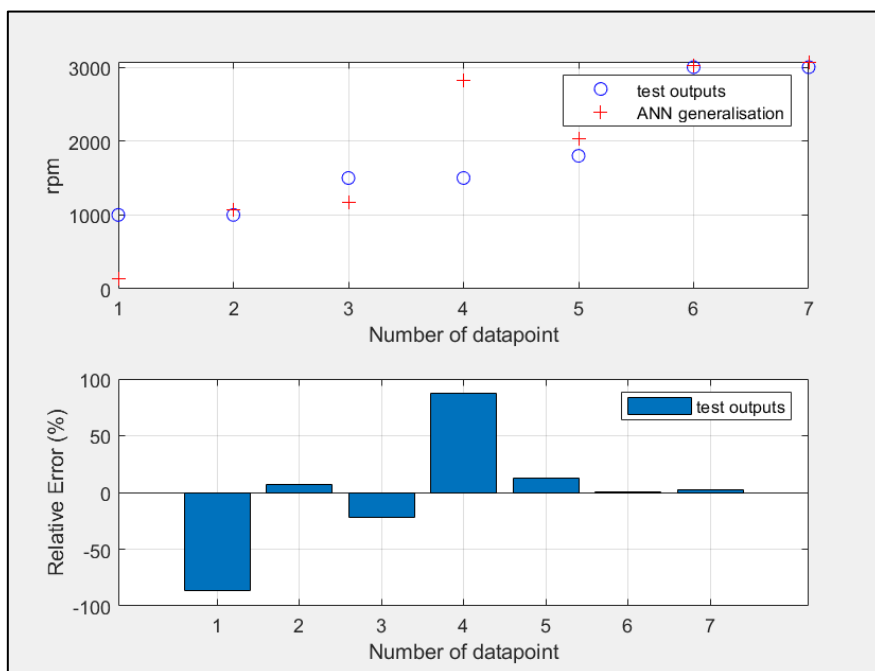
παρατίθενται στην συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα, στις **Εικόνες 42, 43, 44** και **45** φαίνονται τα αποτελέσματα χωρίς την ακτίνα, ενώ οι **Εικόνες 46, 47, 48** και **49** δείχνουν τα αποτελέσματα μετά την πρόσθεση της ακτίνας στα δεδομένα εισόδου με τα οποία το δίκτυο εκπαιδεύτηκε.



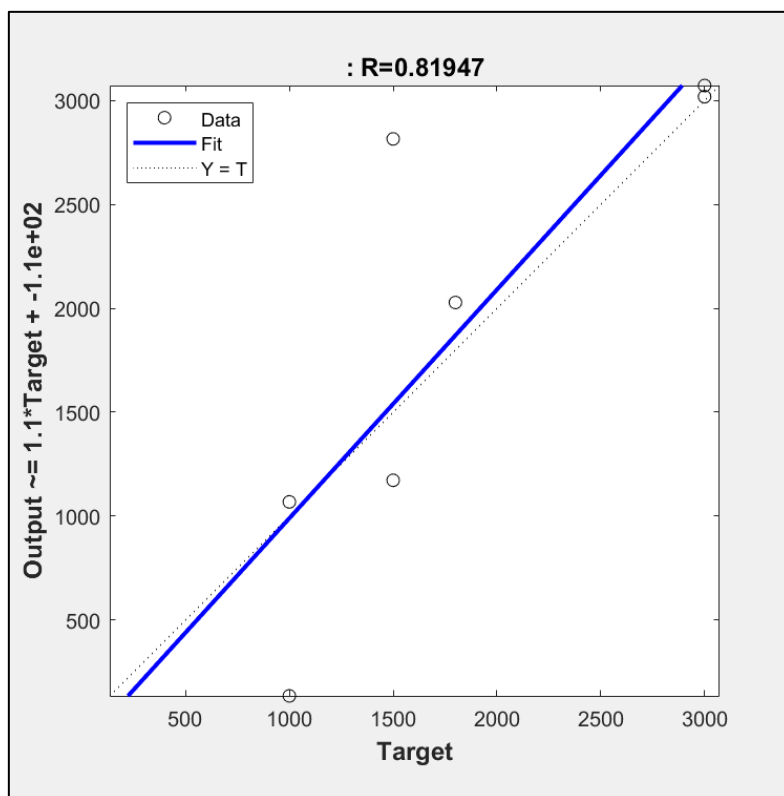
Εικόνα 42. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την ταχύτητα περιστροφής χωρίς την ακτίνα.



Εικόνα 43. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης χωρίς την ακτίνα για την ταχύτητα περιστροφής.

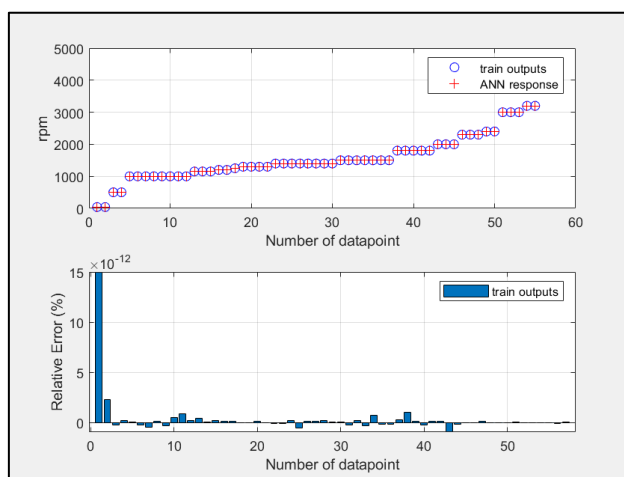


Εικόνα 44. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την ταχύτητα περιστροφής χωρίς την ακτίνα.

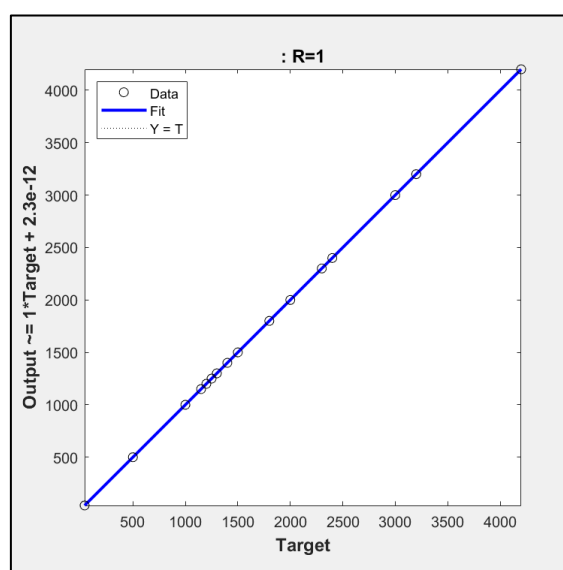


Εικόνα 45. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών χωρίς την ακτίνα για την ταχύτητα περιστροφής.

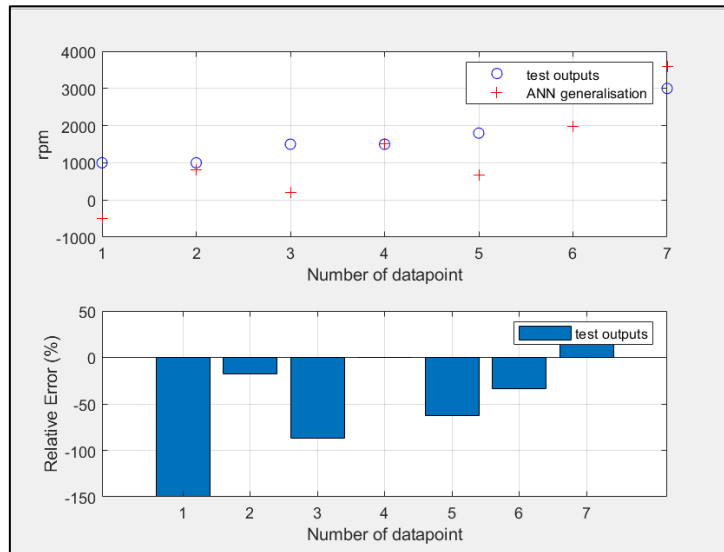
Τα αποτελέσματα αυτού του δικτύου φαίνεται να έχουν υποπέσει σε overfitting, τουλάχιστον για τα δεδομένα της εκπαίδευσης. Παρ' όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ακόμα και με λιγότερους νευρώνες, το μόνο αποτέλεσμα που έδινε αξιόλογο R στο testing ήταν το παραπάνω και για αυτό επιλέχθηκε να παρουσιαστεί (έγιναν δοκιμές για 2 έως 8 νευρώνες ανά επίπεδο και επιλέχθηκε το δίκτυο των 7 νευρώνων). Ομοίως και με τα προηγούμενα δίκτυα οι ακραίες τιμές εκπαίδευσης παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκλιση ενώ στο κομμάτι των δοκιμών τα πράγματα είναι περισσότερο ζυγισμένα αλλά και πάλι τα σφάλματα είναι σχετικά υψηλά. Για το δίκτυο χωρίς την ακτίνα, το Mean Square Error (MSE) και το Relative Error (RE) που προέκυψαν για το training είναι $2.3588e-22$, $1.2178e-12$ και αντίστοιχα $7.2829e+05$, 47.4420 για το testing.



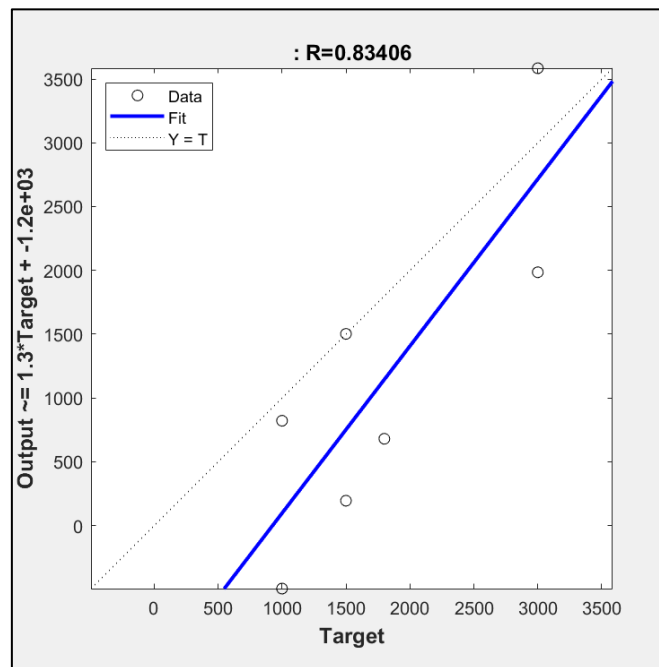
Εικόνα 46. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την ταχύτητα περιστροφής με την προθήκη της ακτίνας



Εικόνα 47. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο της εκπαίδευσης με την προσθήκη της ακτίνας για την ταχύτητα περιστροφής.



Εικόνα 48. Το σχετικό σφάλμα και η απόδοση των δοκιμών του νευρωνικού δικτύου για την ταχύτητα περιστροφής με την προσθήκη της ακτίνας.



Εικόνα 49. Η συσχέτιση των δεδομένων στόχων με τα προβλεπόμενα δεδομένα (R) για το στάδιο των δοκιμών με την προσθήκη της ακτίνας για την ταχύτητα περιστροφής.

Τα αποτελέσματα μετά την προσθήκη της ακτίνας δεν βελτίωσαν το overfitting που είχε παρατηρηθεί στο στάδιο της εκπαίδευσης. Εντούτοις, αν και φαίνεται να αυξήθηκε κατά λίγο το R του testing, η γραφική παράσταση μας δείχνει κάτι διαφορετικό και μη σχετικό. Έτσι, μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι η ακτίνα δεν σχετίζεται άμεσα ούτε με την

ταχύτητα περιστροφής των προς συγκόλληση τεμαχίων. Για το δίκτυο με την ακτίνα το (MSE) και το (RE) που προέκυψαν για το training είναι $1.3478e-22$, $6.2560e-13$ και αντίστοιχα $6.7720e+05$, 48.5378 για το testing.

Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση άρθρων σχετικά με την τεχνική Friction Welding για την συγκόλληση διαφορετικών υλικών, την αναζήτηση πληροφοριών και χαρακτηριστικών των διαφόρων αυτών υλικών, αλλά και από την ενασχόληση με το κομμάτι την ανάπτυξης και της υλοποίησης πολλών και διαφορετικών νευρωνικών δικτύων, προέκυψαν ορισμένα και ιδιαίτερα συμπεράσματα.

Τα συμπεράσματα αυτά σχετίζονται κυρίως με το κομμάτι των νευρωνικών δικτύων καθώς στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκαν νευρωνικά δίκτυα για πέντε διαφορετικές παραμέτρους κατεργασίας σχετικές με την Friction Welding. Κάθε ένα από αυτά επέστρεφε ως αποτέλεσμα την τιμή της εκάστοτε παραμέτρου, σύμφωνα με την εκπαίδευση που προηγουμένως είχε πραγματοποιηθεί.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν για το σύνολο των νευρωνικών δικτύων που προαναφέρθηκαν είναι τα ακόλουθα:

1. Όλα τα δίκτυα παρουσίασαν υψηλά ποσοστά σφαλμάτων τόσο κατά την εκπαίδευση όσο και κατά το στάδιο των δοκιμών εξαιτίας των λιγοστών δεδομένων εισόδου και εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν.
2. Τα σφάλματα κατά την εκπαίδευση περιορίζονταν κυρίως στις ακραίες τιμές εκπαίδευσης των δικτύων με έμφαση στις χαμηλότερες.
3. Η προσθήκη της ακτίνας της διατομής της επιφάνειας της συγκόλλησης άλλοτε βελτιώνει τα αποτελέσματα, όπως στην περίπτωση της πίεσης σφυρηλάτησης, ενώ άλλοτε είχε αρνητική επίδραση όπως χαρακτηριστικά φάνηκε στους δύο χρόνους που μελετήθηκαν, τον χρόνο τριβής και τον χρόνο σφυρηλάτησης.
4. Η ακτίνα είχε σημασία να χρησιμοποιηθεί μόνο σε μεγέθη που σχετίζονται άμεσα με αυτήν όπως είναι η πίεση τριβής F_p και η πίεση σφυρηλασίας U_p .

5. Τα αποτελέσματα της ακτίνας στην πίεση τριβής δεν μεταβλήθηκαν ιδιαίτερα, γεγονός το οποίο προκάλεσε έκπληξη, καθώς βάσει θεωρίας θα έπρεπε να παρουσιάσουν ελάχιστη βελτίωση.
6. Στο τελευταίο δίκτυο που σχετιζόταν με την ταχύτητα περιστροφής, τα δεδομένα οδήγησαν σε overfitting παρά τον μικρό αριθμό νευρώνων ανά επίπεδο που χρησιμοποιήθηκαν.
7. Για το σύνολο των δικτύων που κατασκευάστηκαν υιοθετήθηκε η αρχιτεκτονική ενός κρυμμένου επιπέδου με ελάχιστους νευρώνες καθώς κρίθηκε η πλέον κατάλληλη δομή λόγω της φύσης και της απλότητας του προβλήματος που μελετήθηκε.

Για την αντιμετώπιση ορισμένων προβλημάτων που εντοπίστηκαν κατά την ανάπτυξη του κώδικα και κατά την διάρκεια των δοκιμών, θα μπορούσε να επαναληφθεί μέρος της παρούσας έρευνας μέσα από το περιβάλλον της γλώσσας Python, όπου υπάρχει πληθώρα πληροφοριών στο διαδίκτυο και σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ότι για την MATLAB.

Επίσης, καθότι στην βιβλιογραφία εντοπίζεται μια έλλειψη δεδομένων αναφορικά με υλικά, παραμέτρους συγκόλλησης και ακόμη και ορισμένες από τις ιδιότητες των υλικών, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα στον δικό μας εξοπλισμό. Αναφορικά με το πλήθος των δεδομένων αυτών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσια ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Παράλληλα, θα μπορούσαν να εισαχθούν επιπλέον κατηγορίες στα δεδομένα εισόδου ώστε να υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ τους και να βελτιστοποιηθεί η απόδοση των δικτύων και από αυτή την πλευρά.

Βιβλιογραφία

- [1] D. K. Rajak, D. D. Pagar, P. L. Menezes και A. Eyvazian, «Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding,» *Journal of Adhesion Science and Technology*, p. 2613–2637, 2020.
- [2] X. Meng, Y. Huang, J. Cao, J. Shen και J. F. dos Santos, «Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding,» *Progress in Materials Science*, pp. 1-74, 2021.
- [3] M. Uzkuť, B. S. Ünlü, S. S. Yilmaz και M. Akdag, «Friction Welding And Its Applications In Today’s World,» 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Friction-Welding-And-Its-Applications-In-Today’s-Uzkuť-Ünlü/a517b4ff97b50dd36dbe230ea196a6f8c6c843ea>. [Πρόσβαση 14 Οκτώβριος 2022].
- [4] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati και A. B. Ismail, «Advances in friction welding process: a review,» *Science and Technology of Welding and Joining*, pp. 534-558, 2013.
- [5] R. A. Gite, P. K. Loharkar και R. Shimpi, «Friction stir welding parameters and application: A review,» *Materials Today: Proceedings*, pp. 361-365, 2019.
- [6] G. Padhy, C. Wu και S. Gao, «Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review,» *Journal of Materials Science & Technology*, pp. 1-38, 2018.
- [7] S. Verma, M. Gupta και J. Misra, «Friction Stir Welding of Aerospace Materials: a State of Art Review,» *DAAAM International Scientific Book*, pp. 135-150, 2016.
- [8] J. Dilip, G. Janaki Ram και B. Stucker, «Additive manufacturing with friction welding and friction deposition processes,» *Int. J. Rapid Manufacturing*, pp. 56-69, 2012.
- [9] N. Shete και S. U. Deokar, «A Review Paper on Rotary Friction Welding,» *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, pp. 1557-1560, 2017.

- [10] D. R. Raghavendra, Sethuram και V. Raghupathy, «Comparison of Friction Welding Technologies,» *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, pp. 1-8, 2015.
- [11] H.-S. Jeong, J.-R. Cho, J.-S. Oh, E.-N. Kim, S.-G. Choi και M.-Y. Ha, «Inertia Friction Welding Process Analysis and Mechanical Properties Evaluation of Large Rotor Shaft in Marine Turbo Charger,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, pp. 83-88, 2010.
- [12] S. S. Bhate και S. G. Bhatwadekar, «A Literature Review of Research on Rotary Friction Welding,» *International Journal of Innovative Technology and Reserach*, pp. 2601-2604, 2016.
- [13] F. Khalfallah, Z. Boumerzoug, R. S. και E. Raouache, «Optimization by RSM on rotary friction welding of AA1100 aluminum alloy and mild steel,» *International Review of Applied Sciences and Engineering*, pp. 34-42, 2020.
- [14] E. Taban, J. E. Gould και J. C. Lippold, «Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization,» *Materials and Design*, pp. 2305-2311, 2010.
- [15] M. Cheepu και W. S. Che, «Friction Welding of Titanium to Stainless Steel Using Al Interlayer,» *Trans Indian Inst Met*, pp. 1563-1568, 2019.
- [16] S. R. S. Bharathi, R. Rajeshkumar, A. R. Rose και V. Balasubramanian, «Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of Friction Welded Dissimilar Joints of Aluminium Alloys,» *Trans Indian Inst Met*, pp. 1-7, 2017.
- [17] C. Myralimohan, S. Haribabu, Y. H. Reddy, V. Muthupandi και K. Sivaprasad, *Evaluation of microstructures and mechanical properties of dissimilar materials by friction welding*, pp. 1107-1113, 2014.
- [18] E. P. Alves, F. P. Neto και C. Y. An, «Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process,» *J. Aerosp.Technol. Manag*, pp. 301-306, 2010.
- [19] U. M. Basheer, A. M. N. Fauzi, M. Hasmaliza και A. I. Badri, «Effect of Rotational Speeds on the Friction Welding of Alumina- Aluminum 6061 alloy joints,» *Malaysian Metallurgical Conference – MMC 2008*, pp. 1-6, 2008.
- [20] M. Uday, M. N. A. Fauzi, H. Zuhailawati και . A. B. Ismail, «Effect of welding speed on mechanical strength of friction welded joint of YSZ–alumina

- composite and 6061 aluminum alloy,» *Materials Science and Engineering A*, pp. 4753-4760, 2011.
- [21] R. Winiczenko και M. Kaczorowski, «Friction welding of ductile iron with stainless steel,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 453-462, 2013.
- [22] N. Ozdemir, «Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed,» *2005*, pp. 2504-2509.
- [23] S. Celik και I. Ersozlu, «Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels,» *Materials and Design*, pp. 907-976, 2009.
- [24] N. Arivazhagan, S. Singh, S. Prakash και G. Reddy, «Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding,» *Materials and Design*, pp. 3036-3050, 2011.
- [25] B. Serkan, M. Kilic και İ. Kirik, «Friction Welding of Dissimilar AISI 304 and AISI 8640 Steels,» *European Journal of Technic*, pp. 79-86, 2016.
- [26] V. Satyanarayana, . G. M. Reddy και . T. Mohandas, «Dissimilar metal friction welding of austenitic–ferritic stainless steels,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 128-137, 2005.
- [27] S. A. A. A. Mousavi και K. A. Rahbar, «Experimental and Numerical Analysis of the Friction Welding Process for the 4340 Steel and Mild Steel Combinations,» *Welding Research*, pp. 178-186, 2008.
- [28] G. Verma, S. Kumar και B. R. Bundel, «A research paper on the comparison of weld strength of friction welding of different materials at two different rpm,» *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, pp. 123-127, 2016.
- [29] D. Ananthapadmanaban, «Mechanisms of friction and their correlation to bond strength of friction welded Ti-6Al-4V similar welds, Low Carbon steel-Stainless steel and Aluminium-Copper dissimilar welds.,» *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJIET)*, pp. 14-20, 2018.

- [30] Ý. Kirik και N. Özdemýr, «Effect of process parameters on the microstructure and mechanical properties of friction-welded joints of AISI 1040/AISI 304L steels,» *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, pp. 825-832, 2015.
- [31] G. S. Chander, G. M. Reddy και A. V. Rao, «Influence of Rotational Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Metal AISI 304-AISI 4140 Continuous Drive Friction Welds,» *Journal of Iron and Steel Research*, pp. 64-73, 2012.
- [32] M. Sahin, «Characterization of properties in plastically deformed austenitic-stainless steels joined by friction welding,» *Materials and Design*, pp. 135-144, 2009.
- [33] M. Sahin, «Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 202-210, 2005.
- [34] A. Handa και V. Chawla, «Experimental study of mechanical properties of friction welded AISI 1021 steels,» *Sadhana*, pp. 1407-1419, 2013.
- [35] J. A. James και R. Sudhish, «Study on Effect of Interlayer in Friction Welding for Dissimilar Steels: SS 304 and AISI 1040,» *Procedia Technology*, pp. 1191-1198, 2016.
- [36] T. Udayakumar, K. Raja, A. T. Abhijit και P. Sathiya, «Experimental investigation on mechanical and metallurgical properties of super duplex stainless steel joints using friction welding process,» *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 558-571, 2013.
- [37] M. Azizieh, M. Khamisi, D. J. Lee, E. Y. Yoon και H. S. Kim, «Characterizations of dissimilar friction welding of ST37 and CK60 steels,» *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 1-9, 2015.
- [38] H. Seli, A. I. M. Ismail, E. Rachman και Z. A. Ahmad, «Mechanical evaluation and thermal modelling of friction welding of mild steel and aluminium,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1209-1216, 2010.
- [39] S. Meshram και G. M. Reddy, «Friction welding of AA6061 to AISI 4340 using silver interlayer,» *Defence Technology*, pp. 292-298, 2015.
- [40] P. V. Koushik και D. Avinash, «Experimental investigations of friction welding using aluminum with mild steel,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, pp. 680-685, 2016.

- [41] S. RN και Surendran S, «Friction Welding to Join Dissimilar Metals,» *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, pp. 1-11, 2012.
- [42] Y. Lekhana, A. Nikhila, K. Bharath, B. Naveen και A. C. Reddy, «Weldability Analysis of 316 Stainless Steel and AA1100 Alloy Hollow Tubes using Rotational Friction Welding Process,» *International Journal of Science and Research (IJSR)*, pp. 622-627, 2015.
- [43] S. S. Deulkar, J. S. Sidhu και G. S. Lathkar, «Experimental Investigation and Statistical Analysis of Friction Welding Parameters for Joining Dissimilar Materials, Al-63400 Alloy and Fe410WA».
- [44] H. Dey, M. Ashfaq, A. Bhaduri και K. P. Rao, «Joining of titanium to 304L stainless steel by friction welding,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 5862-5870, 2009.
- [45] S. Meshram, T. Mohandas και G. M. Reddy, «Friction welding of dissimilar pure metals,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 330-337, 2007.
- [46] Shanjeevi.C, K. Satish και P. Sathiya, «Evaluation of Mechanical and Metallurgical properties of dissimilar materials by friction welding,» *Procedia Engineering*, pp. 1514-1523, 2013.
- [47] C.Shanjeevi, J. Arputhabalan, R. Dutta και Pradeep, «Investigation on the Effect of Friction Welding Parameters on Impact Strength in Dissimilar Joints,» *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering*, pp. 1-6, 2017.
- [48] H. Liu και H. Fujii, «Ultralow rotation speed produces high-quality joint in dissimilar friction welding of Ti–6Al–4V alloy and SUS316L stainless steel,» *Materials Science & Engineering A*, pp. 1-6, 2021.
- [49] J. A. Anandaraj, S. Rajakumar, V. Balasubramanian και V. Petley, «Investigation on mechanical and metallurgical properties of rotary friction welded In718/SS410 dissimilar materials,» *Materials Today: Proceedings*, pp. 962-966, 2021.
- [50] H. Wang, Z. Li, S. Zhao, Z. Li, W. Tang, F. Wu και J. Zhou, «Microstructure Evolution of Inertia Friction Welded Joints of TC21 Titanium Alloy,» *Processes*, pp. 1-12, 2022.

- [51] M. S. Gogheri, M. Kasiri-Asgarani, H. R. Bakhsheshi-Rad, H. Ghayour, M. Rafiei, A. Mostafa και F. Berto, «Friction welding of pure titanium-AZ31 magnesium alloy: Characterization and simulation,» *Engineering Failure Analysis*, pp. 1-14, 2022.
- [52] C. M. Bishop, «Neural networks and their applications,» *Review of Scientific Instruments*, pp. 1803-1832, 1994.
- [53] E. Grossi και M. Buscema, «Introduction to artificial neural networks,» *European Journal of Gastroenterology & Hepatology*, pp. 1046-1055, 2007.
- [54] R. Y. Choi, A. S. Coyner, J. Kalpathy-Cramer, M. F. Chiang και J. P. Campbell, «Introduction to Machine Learning, Neural Networks, and Deep Learning,» *Translational Vision Science & Technology*, pp. 1-12, 2020.
- [55] S.-C. Wang, «Artificial Neural Network,» σε *Interdisciplinary Computing in Java Programming*, Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 81-101.

