



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ανάπτυξη Μοντέλου Πρόβλεψης Ρεολογικής Απόδοσης
Μιγμάτων Σκυροδέματος και Κονιάματος με τη Μέθοδο των
Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Διπλωματική Εργασία

του

Άγγελου Γαλάτη

Επιβλέπων:

Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης | Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2024

ΕΟΣ ΔΕ 2024/01

Γαλάτης Α. (2024).

Πρόβλεψη Ρεολογικής Απόδοσης Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος με Χρήση της

Μεθόδου των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Διπλωματική Εργασία ΕΟΣ ΔΕ 2024/01

Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Galatis A. (2024).

Predicting Rheological Performance of Self-Compacting Mortars Using Artificial Neural

Network

Diploma Thesis ΕΟΣΔΕ 2024/01

Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	ii
Λίστα Πινάκων.....	iv
Λίστα Εικόνων.....	iv
Λίστα Γραφημάτων.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract.....	viii
Ευχαριστίες.....	ix
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ & ΚΟΝΙΑΜΑ.....	10
1.1.1 Ορισμός.....	10
1.1.2 Συστατικά Αυτοσυμπκνούμενου Σκυροδέματος και Κονιάματος [8,15].....	11
1.1.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα.....	13
1.2 ΡΕΟΛΟΓΙΑ ΑΣΣ.....	14
1.2.1 Βασικές Ρεολογικές Έννοιες.....	14
1.2.2 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Ρεολογίας ΑΣΣ & ΑΣΚ.....	17
1.2.3 Ειδικά Ρεολογικά Μοντέλα ΑΣΣ & ΑΣΚ.....	24
1.3 ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	27
1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	32
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	33
2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	33
2.1.1 Μέθοδοι Εμπειρικού Σχεδιασμού.....	34
2.1.2 Μέθοδοι Βασισμένες στη Βέλτιστη Πυκνότητα Στοιβαξης.....	36
2.1.3 Μέθοδοι Βασισμένες στη Θλιπτική Αντοχή.....	39
2.1.4 Μέθοδοι Βασισμένες σε Μοντέλο Ρεολογίας της Πάστας.....	40
2.1.5 Μέθοδοι Βασισμένες σε Στατιστικό Παραγοντικό Μοντέλο.....	41
2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	43
2.2.1 Νευρωνικά Δίκτυα Πρόσθιας Τροφοδότησης (Feed-forwardnetwork).....	43
2.2.2 Επαναληπτικά Νευρωνικά Δίκτυα (RNN).....	44
2.2.3 Δίκτυα Μακράς Βραχυπρόθεσμης Μνήμης (LSTM).....	45
2.2.4 Συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN).....	45
2.2.5 Αλγόριθμος Οπισθοδιάδοσης Σφάλματος (Back-propagation).....	46
2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ.....	47

3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	49
3.1	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ & ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	49
3.1.1	Βιβλιογραφικά Δεδομένα.....	50
3.1.2	Πειραματικά Δεδομένα.....	50
3.1.3	Διαδικασία Αξιολόγησης & Κατάταξης Δεδομένων	51
3.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΝΔ.....	52
3.3	ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	54
4	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	61
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	64
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1-1. Διάκριση κατηγοριών εξάπλωσης σκυροδέματος σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8:2010[27].	17
Πίνακας 1-2. Διάκριση κατηγοριών ιξώδους αναφορικά με το χρόνο εξάπλωσης t_{500} σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8:2010[27].	18
Πίνακας 1-3. Διάκριση κατηγοριών VSI σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8:2010 [17].	19
Πίνακας 2-1. Μέθοδοι σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ.	42
Πίνακας 2-2. Εφαρμογές ΤΝΔ στην επιστήμη του σκυροδέματος.	48
Πίνακας 3-1. Πίνακας μεταβλητών εισόδου.	52
Πίνακας 3-2. Εξεταζόμενες τιμές των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πίνακας 3-3. Υπερπαραμέτροι και αποτελέσματα ακρίβειας για καθένα από τα 6 δοκιμαστικά μοντέλα ANN που προτείνονται.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1-1. Πρότυπος εξοπλισμός για τη δοκιμή της ανεμπόδιστης εξάπλωσης σκυροδέματος [17].	17
Εικόνα 1-2. Απεικόνιση εξοπλισμού μικρής δοκιμής ανεμπόδιστης εξάπλωσης[6].	18
Εικόνα 1-3. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή χοάνης V[17].	19
Εικόνα 1-4. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή μικρής χοάνης V[17].	20
Εικόνα 1-5. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή δοχείου U[17].	21
Εικόνα 1-6. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή δοχείου L με τις απαιτούμενες διαστάσεις.	22
Εικόνα 1-7. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή δακτυλίου J [17].	23
Εικόνα 1-8. Πρότυπος εξοπλισμός για τη δοκιμή της ανεμπόδιστης εξάπλωσης σκυροδέματος.	24
Εικόνα 1-9. Σχηματική απεικόνιση τεχνητού νευρώνα.	28
Εικόνα 1-10. Σχηματική απεικόνιση τεχνητού νευρώνα.	28
Εικόνα 1-11. Σχηματική απεικόνιση τεχνητού νευρώνα.	28
Εικόνα 2-1. Προτεινόμενη μεθοδολογία επίτευξης ΑΣΣ σύμφωνα με τους Okamura&Ozawa [37].	34
Εικόνα 2-2. Μεθοδολογία σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Edamatsuetal. [36].	35
Εικόνα 2-3. Μέθοδος UCL για το σχεδιασμό μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τον Domone [35].	366
Εικόνα 2-4. Μέθοδος DMDA για το σχεδιασμό μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Hwangetal. [39].	38
Εικόνα 2-5. Μεθοδολογία σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Peterssonetal. [46].	39
Εικόνα 2-6. Μεθοδολογία σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Peterssonetal.[47].	40
Εικόνα 2-7. Μεθοδολογία σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Buietal. [42].	41
Εικόνα 2-8. Παράδειγμα ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης με δύο κρυφά επίπεδα νευρώνων.	44
Εικόνα 3-1. Διαδικασία βελτιστοποίησης ενός μοντέλου ΤΝΔ.	54
Εικόνα 3-2. Η αρχιτεκτονική του βελτιστοποιημένου μοντέλου ΤΝΔ.	59
Εικόνα 3-3. Πίνακας σύγκρισης που απεικονίζει τα αποδεκτά και απορριφθέντα αποτελέσματα.	60

Λίστα Γραφημάτων

Γράφημα 3-1. Καμπύλη εμπειρικού σφάλματος συναρτήσει των εποχών του αλγορίθμου ΤΝΔ για καθένα από τα μοντέλα Μ1-6 (α-στ).	57
Γράφημα 3-2. Καμπύλη ακρίβειας συναρτήσει των εποχών του αλγορίθμου ΤΝΔ για καθένα από τα μοντέλα Μ1-6 (α-στ).	58
Γράφημα 4-1. Διάγραμμα βαθμού επιρροής μεταβλητών εισόδου Shapley Additive exPlanations (SHAP) importance.	61
Γράφημα 4-2. Γράφημα καταρράκτη για τις τιμές SHAP κάθε μεταβλητής εισόδου.	63

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΟΣ ΔΕ 2024/01

**Ανάπτυξη Μοντέλου Πρόβλεψης Ρεολογικής Απόδοσης Μιγμάτων Σκυροδέματος
και Κονιάματος με τη Μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων**

Γαλάτης Α. (Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Ε.)

Περίληψη

Τα Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ) και Αυτοσυμπυκνούμενο Κονίαμα (ΑΣΚ) αποτελούν δομικά υλικά υψηλής απόδοσης που εφαρμόζονται στον κατασκευαστικό κλάδο εξαιτίας των εξαιρετικών ρεολογικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων. Η απουσία συγκεκριμένων προτύπων ή οδηγιών καθιστά τον σχεδιασμό των ΑΣΣ και ΑΣΚ μια μεγάλη πρόκληση για τους ερευνητές. Στην παρούσα μελέτη αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του συνδυασμού μιγμάτων για την παραγωγή στιβαρών και σταθερών αυτοσυμπυκνούμενων μιγμάτων με κατάλληλο ιξώδες και όριο διαρροής. Το μοντέλο πρόβλεψης δημιουργήθηκε κάνοντας χρήση της μεθόδου των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ενός χρήσιμου εργαλείου μηχανικής μάθησης για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων μη γραμμικής ταξινόμησης. Για το σκοπό αυτό, συλλέχθηκαν βιβλιογραφικά και πειραματικά δεδομένα περιγραφής τόσο των αναλογιών σύνθεσης όσο και των ιδιοτήτων του υλικού. Η αρχιτεκτονική του μοντέλου βελτιστοποιήθηκε πολύ παραμετρικά με κριτήριο της ακρίβεια πρόβλεψης έπειτα από δοκιμή περίπου 22.000 μοντέλων. Η ακρίβεια πρόβλεψης του βέλτιστου μοντέλου ανέρχεται στο 85%. Από τον υπολογισμό της σημαντικότητας κάθε εξεταζόμενης μεταβλητής εισόδου, προέκυψε ότι η ειδική επιφάνεια του πληρωτικού υλικού, ο δείκτης σφαιρικότητάς του καθώς και η περιεκτικότητα του στη σύνθεση αποτελούν σημαντικές μεταβλητές πρόβλεψης. Επίσης σημαντικό ρόλο επιρροής κατέχει και η κατανομή μεγέθους της κοκκομετρίας του λεπτού αδρανούς. Το εν λόγω μοντέλο θα μπορούσε να αποτελέσει ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο στον ερευνητικό και βιομηχανικό κλάδο για το σχεδιασμό αυτοσυμπυκνούμενων μιγμάτων, εξοικονομώντας χρόνο, καθώς και οικονομικούς και φυσικούς πόρους.

Λέξεις-κλειδιά: Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, Μηχανική Μάθηση, Αυτοσυμπυκνούμενο Κονίαμα, Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, Πληρωτικό Υλικό

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
LABORATORY OF REINFORCED CONCRETE

DIPLOMA THESIS
ΕΟΣ ΔΕ 2024/01

Development of a Prediction Model for Predicting Rheological Performance of Self-Compacting Concrete and Mortar Mixtures Using Artificial Neural Networks

Galatis A. (Supervisor: Badogiannis E.)

Abstract

Self-compacting concrete (SCC) and self-compacting mortar (SC mortar) are high-performance building materials used in the construction industry because of their excellent rheological and mechanical properties. SCC and SC mortar mix design is a challenging research area without current and specific standards or guidelines. A prediction model was developed in this study to assess the suitability of mix designs to produce robust and stable self-consolidating mixtures with appropriate viscosity and yield stress characteristics. The prediction model was created using artificial neural network techniques, a useful machine learning tool for solving complex nonlinear classification problems. Bibliographic and experimental input data describing both the composition proportions and material properties were collected, and the model architecture was optimized multiparametrically in terms of prediction accuracy and model fitting after testing approximately 22,000 models. The prediction accuracy of the optimized model is approximately 85%. After calculating the importance of each input feature, specific surface area of filler materials, particle size distribution of fine aggregate and the content of fine filler materials, along with their sphericity index, are the strongest predictive variables. This model could serve as a reliable tool for researchers and industries to use to design self-compacting mixtures, saving laboratory time as well as financial and natural resources.

Keywords: Artificial Neural Network, Deep Learning, Self-Compacting Mortar, Self-Compacting Concrete, Filler Material

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών. Δράττομαι λοιπόν της ευκαιρίας να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με συνόδευσαν σε αυτό το ταξίδι.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Ευστράτιο Γ. Μπαδογιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα. Χάρη σε αυτόν, είχα την ευκαιρία να δραστηριοποιηθώ πάνω σε ένα τομέα, αυτόν της Μηχανικής Μάθησης και των ΤΝΔ, ο οποίος με ελκύει ιδιαίτερα. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την άριστη συνεργασία μας και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Στη συνέχεια ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και φίλο, Ανδρέα Κουνάδη, ο οποίος με τις αστείρευτες γνώσεις του γύρω από την επιστήμη των υλικών με βοήθησε ώστε να κατανοήσω πλήρως το θέμα της συγκεκριμένης μελέτης. Η καθοδήγηση του ήταν καταλυτική σε όλους τους τομείς.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους στενούς μου φίλους για τη στήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς αυτούς, αναμφίβολα, δεν θα τα είχα καταφέρει.

Γαλάτης Άγγελος

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγική ενότητα, η οποία αναφέρεται σε χρήσιμες έννοιες και όρους σχετικούς με το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και περιλαμβάνει τον σκοπό και τη δομή της εν λόγω μελέτης.

1.1 ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ & ΚΟΝΙΑΜΑ

1.1.1 Ορισμός

Το σκυρόδεμα πρόκειται για ένα δομικό υλικό με ευρεία χρήση στην κατασκευαστική βιομηχανία παγκοσμίως εξαιτίας της εύκολης διαδικασίας παραγωγής και διάστρωσης του στα δομικά στοιχεία των κατασκευών[1]. Σημαντικό στάδιο της διάστρωσης του υλικού αποτελεί η συμπύκνωση, δηλαδή η διαδικασία απομάκρυνσης του αέρα ο οποίος εγκλωβίζεται στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος κατά την παραγωγή και εφαρμογή του. Η συμπύκνωση πραγματοποιείται με την εφαρμογή εξωτερικής ενέργειας, η οποία συνήθως επιτυγχάνεται με τη χρήση δονητών μάζας στο νωπό σκυρόδεμα κατά τη χύτευσή του[2].

Ωστόσο, η χρήση πυκνότερου οπλισμού στα δομικά στοιχεία που υπαγορεύουν οι αντισεισμικοί κανονισμοί (π.χ. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός[3]) καθιστούν δυσχερή τη χρήση δονητών μάζας. Ακόμη, η συνεχής ανάπτυξη του κατασκευαστικού κλάδου απαιτεί τη δυνατότητα αξιόπιστων, ασφαλών και ταυτόχρονα γρήγορων κατασκευών. Επιπλέον, τα υψηλά επίπεδα θορύβου που προκύπτουν από τη χρήση τους, συνδέονται με τη διαμόρφωση ενός ανθυγιεινού περιβάλλοντος εργασίας, ενώ σε συνδυασμό με την έλλειψη κατάλληλης εκπαίδευσης του προσωπικού αυξάνουν τον κίνδυνο να λάβει χώρα κάποιο εργατικό ατύχημα[4,5]. Για τους παραπάνω λόγους προέκυψε η ανάγκη ανάπτυξης νέων υλικών όπως είναι το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ) και το αυτοσυμπυκνούμενο κονίαμα (ΑΣΚ).

- **Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ)**

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ) αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία τη δεκαετία του '80, και εν συνεχεία μελετήθηκε και στην Ευρώπη, όπου και σημειώθηκε αυξανόμενη χρήση κατά τον 21^ο αιώνα[6-8]. Το ΑΣΣ έχει τη δυνατότητα πλήρωσης οποιουδήποτε τύπου οπλισμού, ενώ η ικανότητα συμπύκνωσής του οφείλεται στο ίδιο του το βάρος και τη ρεολογική του συμπεριφορά, και δεν απαιτεί τη χρήση μηχανικών μέσων [6,7]. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του ΑΣΣ, η πληρωτική του ικανότητα, οι ρεολογικές του ιδιότητες, η αντλησιμότητα, και η

βιωσιμότητά του το καθιστούν ιδανική επιλογή σε περιπτώσεις πλήρωσης γεωμετρικά σύνθετων διατομών, παρουσίας πυκνού οπλισμού, δύσβατων σημείων[8,9] κ.α.

- **Αυτοσυμπυκνούμενο Κονίαμα (ΑΣΚ)**

Το αυτοσυμπυκνούμενο κονίαμα (ΑΣΚ) πρόκειται για μια πιο λεπτόρρευση εκδοχή του ΑΣΣ με καλύτερη πρόσφυση. Για το λόγο αυτό καθίσταται κατάλληλο σε επισκευές, αναμορφώσεις, αρμολόγηση, και γενικότερα εφαρμογές που απαιτούν λεπτό φινίρισμα[10-12]. Εάν ένα ΑΣΣ πληροί τα κριτήρια αυτοσυμπύκνωσης που ορίζονται από τις οδηγίες του EFNARC και εξετάζονται μέσω των δοκιμών καθίζησης και χρόνου εκκένωσης/εκροής, τότε η κατάλληλη προσθήκη λεπτών αδρανών οδηγεί στο σχηματισμό ΑΣΚ [8,13,14].

1.1.2 Συστατικά Αυτοσυμπυκνόμενου Σκυροδέματος και Κονιάματος [8,15]

Τα υλικά των ΑΣΣ και ΑΣΚ απαιτείται να συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές του Ευρωπαϊκού Προτύπου ΕΛΟΤ EN 206-1, το οποίο καλύπτει και το κοινό σκυρόδεμα. Τα επιμέρους συστατικά είναι το τσιμέντο, τα αδρανή, το νερό ανάμιξης, τα πρόσθετα, τα χημικά πρόσμικτα, και οι ίνες, τα οποία καθορίζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε επιθυμητού μίγματος.

- **Τσιμέντο**

Το τσιμέντο είναι το κύριο δεσμευτικό συστατικό στο σκυρόδεμα και το κονίαμα, και όλοι οι τύποι που συμμορφώνονται με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 197-1 αποδεικνύονται κατάλληλοι για την παραγωγή ΑΣΣ και ΑΣΚ. Ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου προκύπτουν διαφορετικοί τύποι ΑΣΣ και ΑΣΚ. Η σωστή επιλογή έγκειται όχι μόνο στις απαιτήσεις της εφαρμογής στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το ΑΣΣ και ΑΣΚ, αλλά και στη διαθεσιμότητα του τσιμέντου που κατέχει ο κατασκευαστής, καθώς και στις ειδικές απαιτήσεις του ίδιου του υλικού.

- **Αδρανή**

Τα αδρανή συστατικά πρέπει να συμμορφώνονται με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 12620. Διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη σύνθεση του σκυροδέματος και διακρίνονται σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα. Ζωτικής σημασίας θεωρούνται οι ιδιότητές τους, όπως είναι η υγρασία, η υδατοαπορροφητικότητα, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να ελέγχονται με στόχο τη

διατήρηση της ποιότητας των παραγόμενων ΑΣΣ και ΑΣΚ. Το μέγεθος των αδρανών δεν ξεπερνά τα 20 mm, ενώ το ποσοστό των χονδρόκοκκων αδρανών περιορίζεται ούτως ώστε να επιτυγχάνεται επιθυμητή ρευστότητα και ιξώδες του μίγματος. Αναφορικά με τα λεπτόκοκκα αδρανή, αυτά επηρεάζουν τις ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ περισσότερο από τα χονδρόκοκκα. Η κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση των λεπτόκοκκων αδρανών είναι απαραίτητη για την επίτευξη βελτιωμένης ρευστότητας, ακόμη και με μειωμένη προσθήκη πάστας στο μίγμα. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των λεπτόκοκκων αδρανών, όπως η πηγή και η φύση του υλικού, η πορώδες και η ειδική επιφάνεια.

- **Νερό ανάμιξης**

Το νερό που συμμορφώνεται με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 1008 και χρησιμοποιείται για την παραγωγή κοινού σκυροδέματος θεωρείται κατάλληλο και για την παραγωγή ΑΣΣ και ΑΣΚ. Κρίσιμος παράγοντας της ποιότητας των ΑΣΣ και ΑΣΚ είναι ο λόγος νερού/τσιμέντου, ο οποίος πρέπει να ελέγχεται και να κυμαίνεται σε τιμές που επιτρέπουν την επιθυμητή ρευστότητα δίχως να επηρεάζεται η αντοχή.

- **Πρόσθετα**

Η χρήση προσθέτων πραγματοποιείται για την εξασφάλιση των απαιτούμενων ρεολογικών χαρακτηριστικών και την ταυτόχρονη μείωση του κινδύνου παρουσίας φαινομένων διαχωρισμού ή και εξίδρωσης. Τα κυριότερα πρόσθετα είναι αδρανή πληρωτικά, χρωστικές ουσίες, ιπτάμενη τέφρα, παιπάλη πετρωμάτων ή κιμωλίας, πυριτική παιπάλη, σκωρία υψικάμινων, και nanosilica τα οποία βελτιώνουν την εργασιμότητα και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

- **Χημικά πρόσμικτα**

Τα πρόσμικτα είναι χημικές ενώσεις οι οποίες προστίθενται κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος με στόχο τη βελτίωση των ιδιοτήτων του και διακρίνονται στα κύρια (μειωτές νερού, επιταχυντές, επιβραδυντές, αερακτικά) και ειδικά (ρυθμιστές ιξώδους, αναστολείς διάβρωσης).

Αναφορικά με τα κύρια χημικά πρόσμικτα, οι μειωτές νερού επιτρέπουν τη μείωση του νερού στο μίγμα σκυροδέματος δίχως να επηρεάζει τη σύσταση και εργασιμότητά του. Επιπλέον, οι επιταχυντές και επιβραδυντές μειώνουν και αυξάνουν, αντίστοιχα, το χρόνο μετάβασης από την πλαστική στη σκληρόμενη κατάσταση, επιδρώντας στη θλιπτική αντοχή

του σκυροδέματος. Τέλος, τα αερακτικά είναι χημικές ενώσεις οι οποίες συμβάλλουν στην ομοιόμορφη κατανομή φυσαλίδων αέρα στο σκυρόδεμα κατά την ανάμιξη. Κατά την πήξη του σκυροδέματος οι φυσαλίδες αυτές παραμένουν, προσφέροντας αυξημένη αντίσταση κατά τη διάρκεια κύκλων θέρμανσης ή και ψύξης, και, συνεπακόλουθα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ανθεκτικότητας και της διάρκειας ζωής του.

Από την άλλη πλευρά, οι ρυθμιστές ιξώδους αποτελούν υδατοδιαλυτές πολυμερικές ενώσεις οι οποίες συμβάλλουν στην ενίσχυση της στιβαρότητας του σκυροδέματος. Τέλος, οι αναστολείς διάβρωσης συμβάλλουν στην προστασία του χαλύβδινου οπλισμού σκυροδέματος αναστέλλοντας την έναρξη και μειώνοντας το ρυθμό διάβρωσης

- **Ίνες**

Η παρουσία ινών συμβάλλει στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των ΑΣΣ και ΑΣΚ, όπως ακριβώς συμβαίνει και στο κοινό σκυρόδεμα. Οι πιο δημοφιλείς επιλογές ινών είναι οι ίνες χάλυβα, οι οποίες αυξάνουν τη δυσθραυστότητα και βελτιώνουν την καμπτική αντοχή, και οι πολυμερικές ίνες βελτιώνουν την αντίσταση έναντι του διαχωρισμού και την αντίσταση έναντι πυρκαγιάς.

1.1.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Το ΑΣΣ, επομένως, ξεχωρίζει έναντι του συμβατικού σκυροδέματος εξαιτίας των εξαιρετικών του ιδιοτήτων. Παρουσιάζει τον ιδανικό συνδυασμό υψηλής ρευστότητας και υψηλού ιξώδους, καθιστώντας το, αρχικά, ικανό να πληρώνει επιτυχώς τον οπλισμό και να συμπυκνώνεται δίχως την επιβολή εξωτερική ενέργειας. Επιπλέον, η ικανοποιητική ικανότητα διέλευσής του επιτρέπει την ανεμπόδιστη ροή του ακόμη και στην περίπτωση μελών περίπλοκης και λεπτομερούς γεωμετρίας και σύνθετου ή πυκνού οπλισμού δίχως να δημιουργούνται προβλήματα συσσώρευσης ή και μπλοκαρίσματος του υλικού. Ακόμη, η αυξημένη ομοιογένειά του, δηλαδή η αντίσταση που παρουσιάζει έναντι της απόμιξης, το καθιστά ικανό να διατηρεί μια ομοιόμορφη σύνθεση και δομή σε όλο του τον όγκο τόσο κατά τη μεταφορά και τοποθέτηση, όσο και μετά το πέρας της συμπίκνωσής του. Επιπρόσθετα, η βελτιωμένη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμέντου και η ικανότητα του ΑΣΣ να μειώνει την πορώδη δομή του, εξασφαλίζει ευκολότερη εφαρμογή, καθώς και βελτιωμένη δομή και μηχανικές ιδιότητες. Φυσικά, η εξάλειψη της χρήσης ειδικού δονητικού εξοπλισμού για τη συμπίκνωση, όπως προαναφέρθηκε, συμβάλλει στη δραστική μείωση χρόνου, κόστους, και ηχορύπανσης, και

τη σημαντική αύξηση της παραγωγικότητας, και της ασφάλειας και υγιεινής του εργασιακού χώρου. Όλα τα παραπάνω, καθιστούν το ΑΣΣ ένα ελκυστικό και βιώσιμο προϊόν[8,9,16,17].

Ωστόσο, το εν λόγω υλικό συνδέεται και με μειονεκτήματα. Η αυξημένη ρευστότητα του ΑΣΣ σε συνδυασμό με πιθανές αστοχίες ή λανθασμένη διαστασιολόγηση του τύπου μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή και άλλες κακοτεχνίες, γεγονός που καθιστά απαραίτητο να πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις ποιότητας των παρελκόμενων εργασιών της σκυροδέτησης. Επιπλέον, η σύνθεση μιγμάτων ΑΣΣ με συγκεκριμένες ιδιότητες απαιτεί εκτενέστερη μελέτη, και συνεπώς πιο καταρτισμένο προσωπικό που ασχολείται με την παραγωγή, μεταφορά και εφαρμογή του. Τέλος, όμοια με το κοινό σκυρόδεμα, δύναται να παρατηρηθούν αλλοιωμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως τοπικοί αποχρωματισμοί και μειωμένη ανθεκτικότητα, εξαιτίας των λιπαντικών που χρησιμοποιούνται στους τύπους οπλισμού που χρησιμοποιούνται, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη διεξαγωγή δοκιμών πεδίου ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η κατά περίπτωση επιθυμητή σύνθεση ΑΣΣ[17,18].

1.2 ΡΕΟΛΟΓΙΑ ΑΣΣ

1.2.1 Βασικές Ρεολογικές Έννοιες

Η ρεολογία είναι μια ιδιαίτερος σημαντική έννοια για τη διαχείριση του νωπού σκυροδέματος, κατά την οποία μελετάται η ροή του ρευστού, δηλαδή η ικανότητά του να ρέει ελεύθερα και ομοιόμορφα. Αντικείμενο μελέτης και βασικές παράμετροι της ρεολογίας αποτελούν η τάση διαρροής, και το πλαστικό ιξώδες.

Το ιξώδες ενός ρευστού αποτελεί το μέτρο της εσωτερικής τριβής του και ορίζεται ως η αντίσταση του ρευστού στην επιβαλλόμενη παραμόρφωσή του. Η παραμορφωσιμότητα του ρευστού εξαρτάται από την τάση διαρροής του, δηλαδή την ελάχιστη απαιτούμενη διατμητική τάση για την εκκίνηση της ροής του, και υποδηλώνει την αυθόρμητη εξάπλωσή του. Όσο μεγαλύτερη είναι η τριβή, τόσο μεγαλύτερη διατμητική δύναμη απαιτείται για να κινηθεί το ρευστό, και συνεπακόλουθα, τόσο μεγαλύτερο διαμορφώνεται και το ιξώδες του[19,20]. Το ιξώδες ενός ρευστού ορίζεται μαθηματικά από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1.1)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1.2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dx} \quad (1.3)$$

όπου, η το ιξώδες ($\text{Pas} = \text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$), τ η διατμητική τάση, $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης, F η διατμητική δύναμη ($\text{N} - \text{kgms}^{-2}$), A η επίπεδη επιφάνεια των στρωμάτων του ρευστού (m^2), η dV σχετική ταχύτητα των στρωμάτων του ρευστού, και dx η απόσταση των επιφανειών δύο διαδοχικών στρωμάτων του ρευστού (m).

Η παραπάνω γραμμική έκφραση αποτελεί την απλούστερη ρεολογική συμπεριφορά και τα ρευστά που την ακολουθούν ονομάζονται Νευτώνεια ή Νευτωνικά[21]. Τυπικά παραδείγματα Νευτωνικών ρευστών είναι τα αέρια, και γενικά τα συστατικά με μικρή σχετική μοριακή μάζα (π.χ. αέρας, νερό κλπ). Ωστόσο, τα περισσότερα ρευστά αποκλίνουν από τη Νευτώνεια συμπεριφορά. Τα μη Νευτωνικά ρευστά διακρίνονται από την χρονικά ανεξάρτητη και εξαρτημένη ροή τους [21,22].

Αναφορικά με τα μη Νευτωνικά ρευστά με χρονικά ανεξάρτητη ροή, η σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης (τ) και ρυθμού διάτμησης ($\dot{\gamma}$) δεν είναι αναλογική, και διαμορφώνεται ως εξής:

$$\tau = m \dot{\gamma}^k \quad (1.4)$$

όπου, m ο δείκτης συνεκτικότητας, και k ο δείκτης συμπεριφοράς στη ροή. Όταν:

- $k=1$, τότε γίνεται λόγος για ρευστά με Νευτώνεια συμπεριφορά.
- $k<1$, τότε το ρευστό καλείται ψευδοπλαστικό, και το φαινόμενο ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Πρόκειται για μια αρκετά διαδεδομένη κατηγορία ρευστών, με τυπικά παραδείγματα τους χυμούς φρούτων, το αίμα κ.α.
- $k>1$, τότε το ρευστό καλείται διευρυνόμενο/διασταλτικό, και το φαινόμενο ιξώδες αυξάνεται και την αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Πρόκειται για μια πιο σπάνια κατηγορία ρευστών, με τυπικά παραδείγματα τα πυκνά αιωρήματα στερεών (π.χ. αμυλούχες κόλλες).

Μια άλλη διάκριση αυτής της κατηγορίας είναι τα πλαστικά ρευστά ή πλαστικά τύπου Bingham. Τα ρευστά τύπου Bingham μπορεί να είναι Νευτωνικά, ψευδοπλαστικά, ή διασταλτικά ρευστά, τα οποία διαθέτουν όμως και μια οριακή τάση διαρροής (τ_0). Η τιμή αυτή εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη διατμητική τάση για την εκκίνηση της ροής του ρευστού. Η μαθηματική έκφραση αυτών των ρευστών πραγματοποιείται με τη χρήση του μοντέλου

Herschel-Buckley[23]:

$$\tau = m \dot{\gamma}^k + \tau_0 \quad (1.5)$$

Όταν:

- $k=1$, τότε γίνεται λόγος για Νευτώνικά ρευστά Bingham.
- $k<1$, τότε το ρευστό καλείται ψευδοπλαστικό ρευστό Bingham.
- $k>1$, τότε το ρευστό καλείται διασταλτικό ρευστό Bingham.

Αναφορικά με τα μη Νευτώνικά ρευστά με χρονικά εξαρτημένη ροή παρατηρείται η διάκριση σε ρεοηκτικά και θιξοτροπικά ρευστά. Κατά την εφαρμογή διατμητικής τάσης και με την πάροδο του χρόνου το ιξώδες των ρεοηκτικών ρευστών αυξάνεται (π.χ. πυκνό διάλυμα ένυδρου γύψου), και των θιξοτροπικών ρευστών μειώνεται. Η αναστολή της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης οδηγεί στην σταδιακή επαναφορά του ιξώδους στην αρχική του τιμή.

Τελευταία κατηγορία ρευστών αποτελούν τα ιξωδοελαστικά ρευστά, τα οποία παρουσιάζουν συνδυαστικές ιδιότητες ρευστού και ελαστικές ιδιότητες στερεού (π.χ. πίσσα, ζυμάρι). Τα εν λόγω ρευστά παρουσιάζουν μια πιο πολύπλοκη ρεολογική συμπεριφορά, η οποία συνεχώς μελετάται [24].

Το νωπό ΑΣΣ και ΑΣΚ συχνά αναφέρεται σαν πλαστικό τύπου Bingham, $k=1$ [25]. Η ιδιότητα της ροής του οφείλεται στην πάστα του τσιμέντου, ενώ η ρεολογική συμπεριφορά της πάστας καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τα πρόσμικτα. Η εργασιμότητα του σκυροδέματος, δηλαδή η ευκολία ανάμιξης, έγχυσης, συμπίκνωσης, και περάτωσής του αποτελεί καθοριστική έννοια του ΑΣΣ και ΑΣΚ και περιγράφεται μέσω της ικανότητας πλήρωσης, της ικανότητας διέλευσης, και της αντίστασης σε απόμιξη[26].

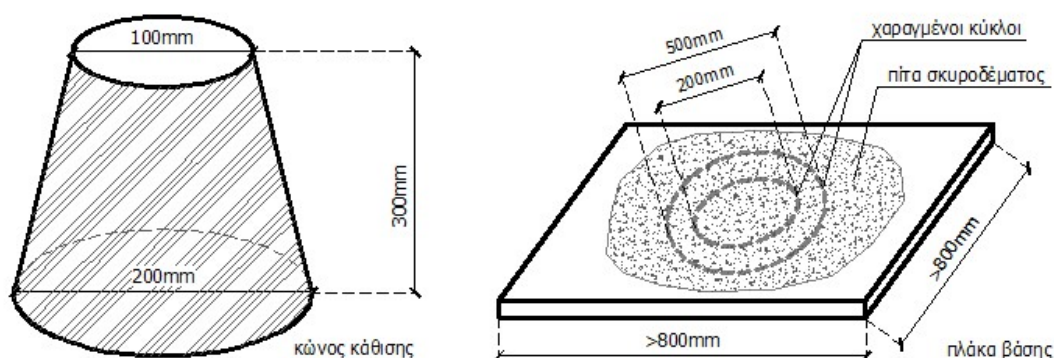
Η ικανότητα πλήρωσης υποδηλώνει την ελεύθερη ροή του ΑΣΣ/ΑΣΚ μόνο υπό την επίδραση του ίδιου του του βάρους, και την ταχύτατη πλήρωση όλων των ειδών των τύπων χωρίς να αφήνει κενά και δίχως την απαίτηση μηχανικής συμπίκνωσης. Η ικανότητα διέλευσης υποδηλώνει την εύκολη και ομαλή διέλευση του ΑΣΣ/ΑΣΚ διαμέσου και περιμετρικά των οπλισμών, και στενών περασμάτων δίχως των κίνδυνο εμπλοκής αδρανών. Τέλος, η αντίσταση σε απόμιξη υποδηλώνει τη διατήρηση ομοιογενούς κατανομής των επιμέρους συστατικών του ΑΣΣ/ΑΣΚ κατά τη ροή και τοποθέτησή του [20].

Οι ρεολογικές ιδιότητες του ΑΣΣ και ΑΣΚ μελετώνται τόσο με τη διεξαγωγή κατάλληλων μεθόδων χαρακτηρισμού, όσο και με την εφαρμογή ειδικών μαθηματικών μοντέλων, όπως παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους.

1.2.2 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Ρεολογίας ΑΣΣ & ΑΣΚ

- Δοκιμή Ανεμπόδιστης Εξάπλωσης (Slump Flow Test - SFT)

Η δοκιμή πραγματοποιείται με την πλήρωση πρότυπου κώνου κάθισης Abrams (Εικόνα 1-1) με νωπό σκυρόδεμα. Ο κώνος ανασηκώνεται κατακόρυφα εντός 3 s, με το σκυρόδεμα να ρέει ανεμπόδιστα. Έπειτα από τη σταθεροποίηση του σκυροδέματος καταγράφονται μετρήσεις δύο διαμέτρων με κάθετες τις μεταξύ τους κατευθύνσεις και λαμβάνεται η μέση τιμή, η οποία κατηγοριοποιεί το ΑΣΣ σύμφωνα με τα στοιχεία του **Πίνακα 1-1**[17,27].



Εικόνα 1-1. Πρότυπος εξοπλισμός για τη δοκιμή της ανεμπόδιστης εξάπλωσης σκυροδέματος [17].

Πίνακας 1-1. Διάκριση κατηγοριών εξάπλωσης σκυροδέματος σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8:2010[27].

Κατηγορία εξάπλωσης	Διάμετρος (mm)
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

- Χρόνος εξάπλωσης t_{500}

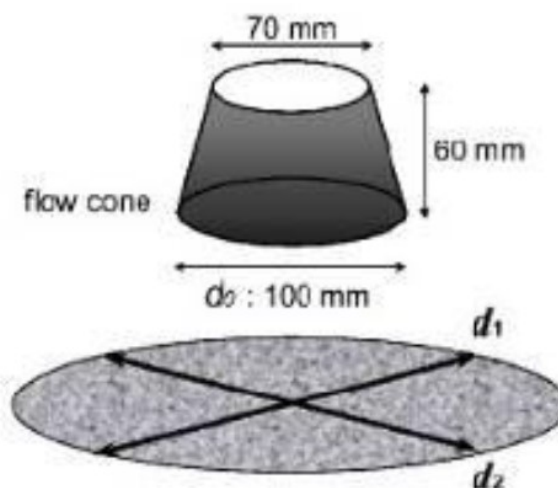
Ως χρόνος t_{500} ορίζεται ο χρόνος εξάπλωσης του σκυροδέματος – ακρίβεια 1/10 του δευτερολέπτου – (βλ. δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης) με χρόνο έναρξης τη στιγμή έναρξης ανύψωσης του κώνου και χρόνο λήξης τη στιγμή η διάμετρος εξάπλωσης οποιαδήποτε σημείου φτάσει τα 500 mm. Ο συγκεκριμένος δείκτης συνδέεται με την ταχύτητα ροής, και συνεπακόλουθα με το ιξώδες του σκυροδέματος, διακρίνοντάς το σε δύο κατηγορίες (**Πίνακας 1-2**)[17,27].

Πίνακας 1-2. Διάκριση κατηγοριών ιξώδους αναφορικά με το χρόνο εξάπλωσης t_{500} σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8:2010[27].

Κατηγορία ιξώδους	Διάμετρος (Mm)
VS1 – χαμηλό ιξώδες	< 2
VS2 – υψηλό ιξώδες	≥ 2

- Μικρή δοκιμή εξάπλωσης (Mini Slump Flow Test)

Η μικρή δοκιμή εξάπλωσης, είναι αντίστοιχη με την δοκιμή εξάπλωσης που χρησιμοποιείται για το ΑΣΣ, αλλά βρίσκει εφαρμογή στα μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου κονιάματος. Η πειραματική της διάταξη αποτελείται από έναν κώνο, όμοιο με τον κώνο του Abrams με ύψος 60mm, διάμετρο βάσης περίπου 100mm και διάμετρο κορυφής 70mm (**Εικόνα 1-2**).



Εικόνα 1-2. Απεικόνιση εξοπλισμού μικρής δοκιμής ανεμπόδιστης εξάπλωσης[6].

Η δοκιμή προσδιορίζει τη ρευστότητα και το ρυθμό ροής του νεπού κονιάματος, ομοίως με τη δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης για το ΑΣΣ. Οι αποδεκτές τιμές της διαμέτρου εξάπλωσης του κονιάματος, όπως αυτές υπαγορεύονται από την EFNARC, είναι μεταξύ 240-260mm.

- Οπτικός Δείκτης Σταθερότητας (Visual Stability Index – VSI)

Ο οπτικός δείκτης σταθερότητας προκύπτει από την εικόνα του εξαπλωμένου σκυροδέματος (βλ. δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης), και λαμβάνει ακέραιες τιμές μεταξύ 0 και 3. Η αύξηση του δείκτη συνεπάγεται με τη μείωση της σταθερότητας του μίγματος, όπως

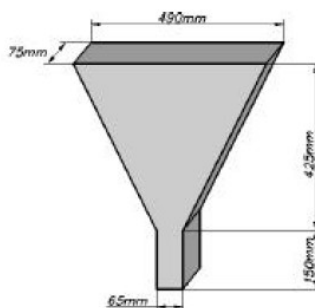
παρουσιάζεται στον **Πίνακα 1-3**.

Πίνακας 1-3. Διάκριση κατηγοριών VSI σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-8:2010 [17].

VSI	Χαρακτηρισμός	Ενδείξεις
0	Υψηλή σταθερότητα μίγματος	Απουσία ενδείξεων απόμιξης
1	Σταθερό μίγμα	Απουσία στεφάνης ή σωρού αδρανών
2	Ασταθές μίγμα – απαιτείται μεταβολή ή προσαρμογή του μίγματος	Παρουσία μικρής στεφάνης (<10 mm) ή σωρού αδρανών
3	Υψηλή αστάθεια μίγματος – απαιτείται μεταβολή ή προσαρμογή του μίγματος	Εμφανής απόμιξη και παρουσία μεγάλης στεφάνης (>10 mm) ή μεγάλης σωρού αδρανών ή συνδυασμός αυτών

- Δοκιμή Χοάνης V (V - Funnel Test)

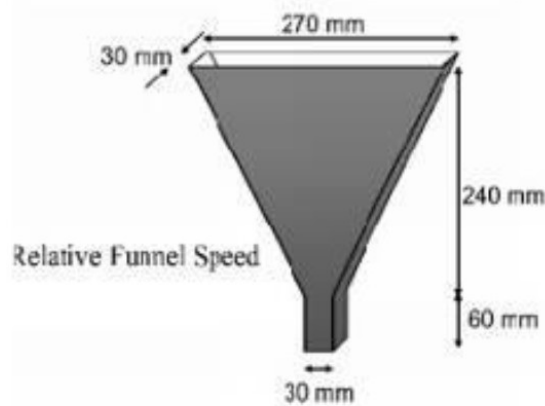
Πρόκειται για μια μέθοδο εκτίμησης της αντίστασης διαχωρισμού και της ικανότητας διέλευσης του μίγματος από στενά ανοίγματα, και συμβάλλει στον προσδιορισμό του ιξώδους. Η δοκιμή περιλαμβάνει μια συσκευής ορθογωνικής διατομής τύπου χοάνης V, το άκρο της οποίας καταλήγει σε μια θύρα εκροής (**Εικόνα 1-2**). Η χοάνη πληρώνεται με ΑΣΣ και στη συνέχεια ανοίγει η θύρα και το μίγμα εκρέει. Κατά την εκροή μετρείται ο χρόνος εκροής t_v (s), δηλαδή ο χρόνος από το άνοιγμα της θύρας μέχρι τη στιγμή που ο παρατηρητής, ενώ στέκεται πάνω από τη χοάνη, βλέπει φως να διέρχεται από αυτήν. Ακολούθως, η χοάνη πληρώνεται εκ νέου με το ίδιο δείγμα, το οποίο αφήνεται σε ηρεμία για 5 min. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται, με αυξημένους χρόνους να υποδεικνύουν φαινόμενα απόμιξης.



Εικόνα 1-3. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή χοάνης V[17].

- Μικρή Δοκιμή Χοάνης V (Mini V – Funnel Test)

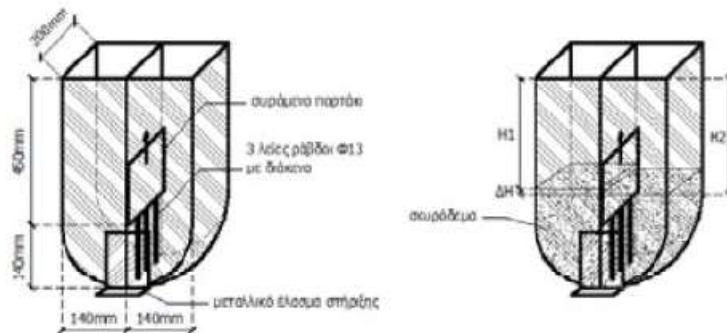
Η μικρή δοκιμή χοάνης V χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει το ιξώδες του νωπού κονιάματος. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μια σκευή τύπου χοάνης με ύψος 240mm, πλάτος 270mm και βάθος κορυφής 30mm. Το ύψος του ακροφύσιου προσδιορίζεται τα 30mm, το πλάτος του στα 60mm ενώ το βάθος του στα 30mm (Εικόνα 1-3). Για τη συγκεκριμένη δοκιμή, ο ERNARC υπαγορεύει τιμές εκκένωσης της χοάνης V μεταξύ των 7 και 11 δευτερολέπτων ώστε το μίγμα να χαρακτηριστεί σαν ΑΣΚ.



Εικόνα 1-4. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη μικρή δοκιμή χοάνης V[17].

- Δοκιμή Δοχείου U (U - Box Test)

Για τη συγκεκριμένη δοκιμή γίνεται χρήση δοχείου ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής σχήματος U με 2 κατακόρυφα διαμερίσματα τα οποία διαχωρίζονται μέσω μιας συρόμενης θύρας (Εικόνα 1-3). Από τη μία πλευρά του ανοίγματος της θύρας βρίσκονται τοποθετημένοι 3 κατακόρυφες λείες χαλύβδινες ράβδοι, και από την άλλη πλευρά της θύρας πληρώνεται το διαμέρισμα με ΑΣΣ. Αμέσως μετά η θύρα ανοίγει και το μίγμα, τείνοντας προς εξισορρόπηση, ρέει προς το δεύτερο διαμέρισμα και καταγράφεται η υψομετρική διαφορά του ΑΣΣ ανάμεσα στα δύο διαμερίσματα. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αποτελούν ένδειξη της ικανότητας διέλευσης του ΑΣΣ διαμέσου των οπλισμών, με τη μέγιστη επιτρεπόμενη υψομετρική διαφορά να ορίζεται στα 30mm[17].

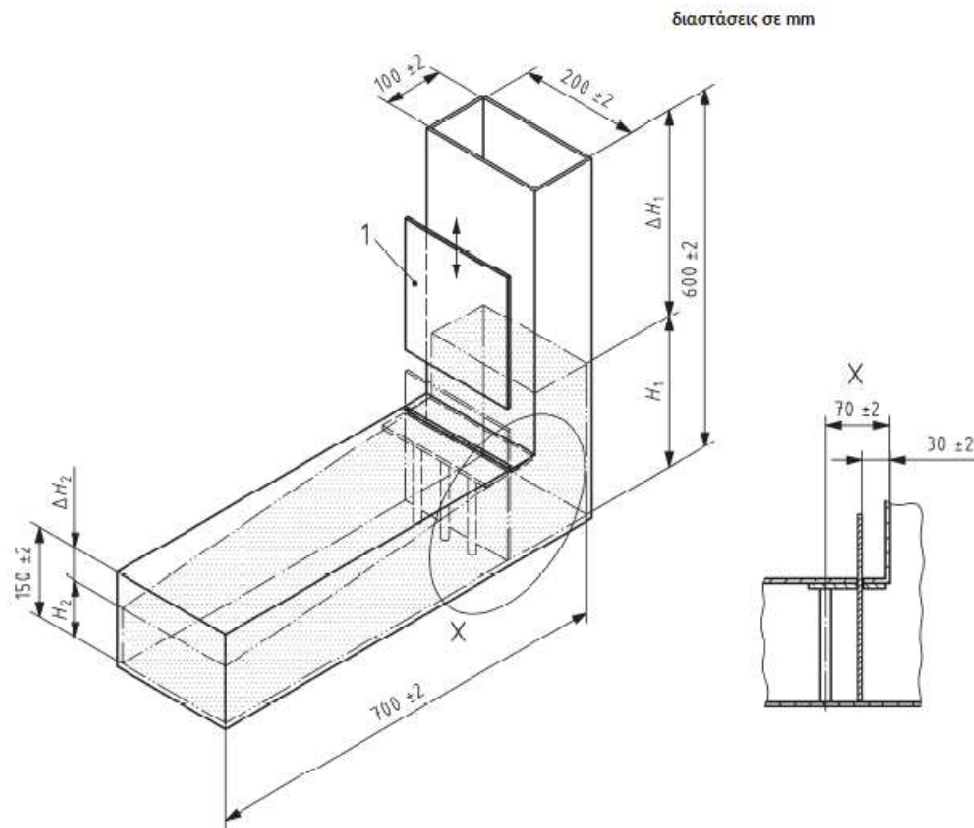


Εικόνα 1-5. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή δοχείου U[17].

- Δοκιμή Δοχείου L (L - Box Test)

Η δοκιμή δοχείου L, είναι παραπλήσια με αυτή του δοχείου U, και εκτιμά την ικανότητα διέλευσης του μίγματος διαμέσου πυκνού οπλισμού ή στενών ανοιγμάτων χωρίς να παρατηρούνται φαινόμενα απόμιξης ή έμφραξης. Για τη συγκεκριμένη δοκιμή γίνεται χρήση δοχείου ορθογωνικής διατομής σχήματος L με 2 ή 3 κατακόρυφες λείες χαλύβδινες ράβδους και μια θύρα τοποθετημένα εκεί που τέμνονται το κατακόρυφο και οριζόντιο τμήμα του δοχείου (Εικόνα 1-4). Το δοχείο πληρώνεται με ΑΣΣ και αμέσως μετά η θύρα ανασηκώνεται, αφήνοντας το μίγμα να εκρεύσει στο οριζόντιο τμήμα του δοχείου.

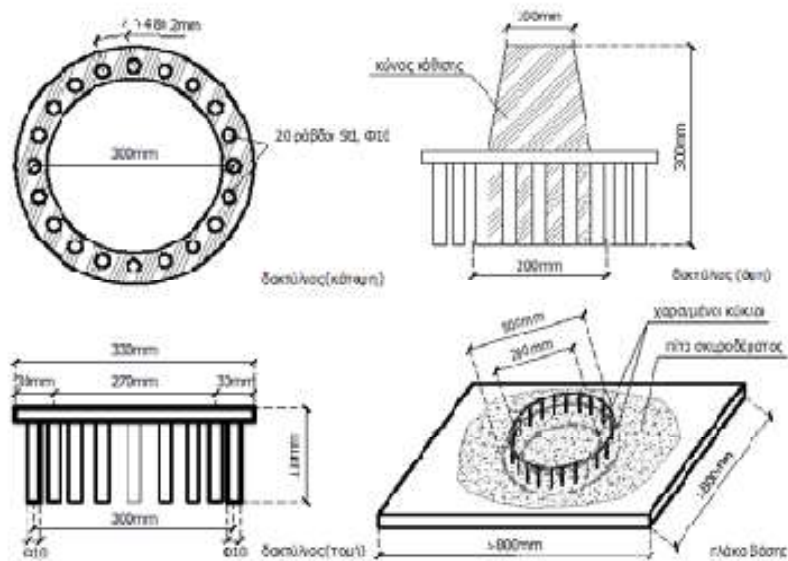
Ο λόγος υψών του ΑΣΣ μεταξύ του άκρου του οριζόντιου και του κατακόρυφου τμήματος του δοχείου πρέπει να ισούται κατ'ελάχιστο με 0,8, με τις υψηλότερες τιμές να συνεπάγονται καλύτερη δυναμική ροή του ΑΣΣ[17,28].



Εικόνα 1-6. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή δοχείου L με τις απαιτούμενες διαστάσεις.

- Δοκιμή Δακτυλίου J (J – Ring Test)

Σε αυτήν την περίπτωση, πρότυπος κώνος Adams περιβαλλόμενος από δακτύλιο με κάθετες λείες χαλύβδινες ράβδους πληρώνεται σε μία φάση δίχως κάποια μηχανική συμπύκνωση ή ανάδευση (**Εικόνα 1-5**). Εν συνεχεία ο κώνος ανασηκώνεται και το σκυροδέμα ρέει διαμέσου των ράβδων. Έπειτα από τη σταθεροποίηση του σκυροδέματος καταγράφονται μετρήσεις δύο διαμέτρων με κάθετες τις μεταξύ τους κατευθύνσεις και λαμβάνεται η μέση τιμή αναφερόμενη στη ροή διαμέσου του δακτυλίου J. Το μέγεθος αυτό αποτελεί μέτρο της ικανότητας διέλευσης του ΑΣΣ διαμέσου ράβδων οπλισμού και κρίνεται επιτυχής για τιμές ≤ 10 mm[17,29].



Εικόνα 1-7. Απεικόνιση εξοπλισμού για τη δοκιμή δακτυλίου J[17].

- Δοκιμή Σταθερότητας Μέσω Κοσκίνισης

Η εν λόγω δοκιμή προσδιορίζει τη σταθερότητα του μίγματος και υποδεικνύει φαινόμενα πιθανής απόμιξης. Η εξέταση περιλαμβάνει, αρχικά, την τοποθέτηση 10 L σκυροδέματος σε δοχείο δειγματοληψίας. Το δείγμα αφήνεται σκεπασμένο σε ηρεμία για 15 min, κατά τα οποία καταγράφονται πιθανά φαινόμενα εξίδρωσης. Έπειτα, περίπου 2 L σκυροδέματος λαμβάνονται από το πάνω μέρος του μίγματος και διέρχονται από το κόσκινο, το οποίο διαθέτει τετραγωνικά ανοίγματα μεγέθους 5 mm, και καταλήγει σε δοχείο συλλογής. Μετά το πέρας 2 min διαχωρισμού καταγράφεται η μάζα σκυροδέματος που διέρχεται (m_a) και η μάζα σκυροδέματος που συγκρατείται (m_b) από το κόσκινο, και προσδιορίζεται το ποσοστό απόμιξης, SR (%), από την ακόλουθη σχέση, με αποδεκτή αντίσταση διαχωρισμού να προκύπτει για τιμές SR μεταξύ 5 και 15%.

$$SR = 100 \frac{m_b}{m_a} \quad (1.6)$$

- Δοκιμή Προσδιορισμού Πυκνότητας Νωπού Σκυροδέματος

Αναφορικά με τον προσδιορισμό της πυκνότητας, νωπό σκυρόδεμα πληρώνει σε μία φάση κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο όγκου τουλάχιστον 5L, δίχως κάποια μηχανική

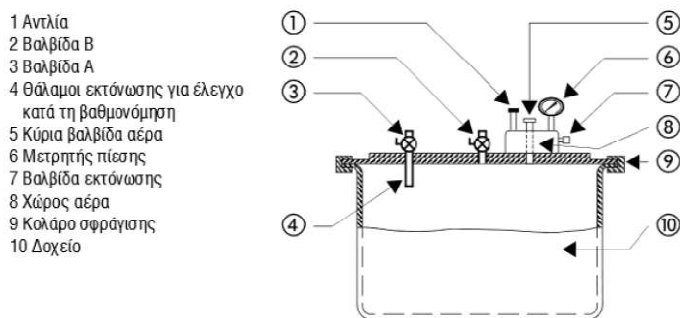
συμπύκνωση ή ανάδευση. Για τον υπολογισμό λαμβάνεται ζύγιση του άδειου και του γεμάτου δοχείου και γίνεται χρήση της ακόλουθης σχέσης[30]:

$$d = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1.7)$$

όπου, d η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος (kg/m^3), m_1 και m_2 η μάζα του άδειου και του γεμάτου δοχείου αντίστοιχα (kg), και V_0 όγκος του δοχείου (m^3).

- Δοκιμή Προσδιορισμού Περιεχόμενου Αέρα

Για τον προσδιορισμό του περιεχόμενου αέρα εφαρμόζεται η μέθοδος εξισορρόπησης της πίεσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12360-7. Νωπό σκυρόδεμα πληρώνει σε μία φάση κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο όγκου τουλάχιστον 5L, δίχως κάποια μηχανική συμπύκνωση ή ανάδευση. Η διάταξη που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1-6** και ο προσδιορισμός βασίζεται στην εξισορρόπηση αέρα δεδομένου όγκου και πίεσης με τον άγνωστο όγκο του αέρα που περιλαμβάνεται στο σκυρόδεμα [31].

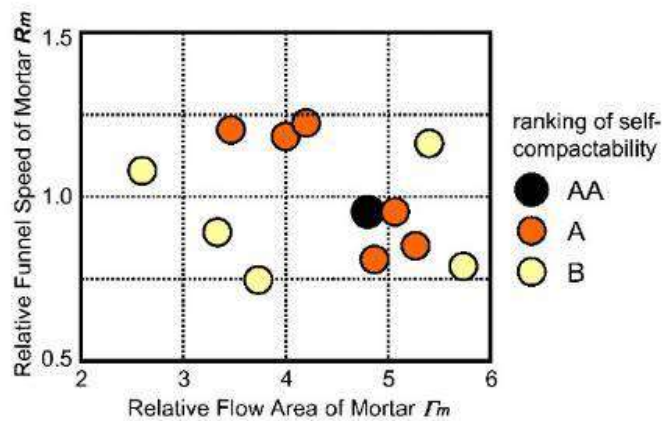


Εικόνα 1-8. Πρότυπος εξοπλισμός για τη δοκιμή της ανεμπόδισης εξάπλωσης σκυροδέματος.

1.2.3 Ειδικά Ρεολογικά Μοντέλα ΑΣΣ & ΑΣΚ

Υπό τη θεώρηση ότι το κονίαμα του σκυροδέματος μπορεί να περιγραφεί ως ρευστό Bingham προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της μικρής δοκιμής εξάπλωσης (μέση διάμετρος εξάπλωσης) και της μικρής δοκιμής χοάνης V (χρόνος ροής) μπορούν να συσχετισθούν με την τάση διαρροής και το πλαστικό ιξώδες του νωπού μίγματος, αντίστοιχα. Διάφορες προτεινόμενες μεθοδολογίες κάνουν χρήση των δεικτών σχετικής επιφάνειας (Γ_m) και σχετικής ταχύτητας χοάνης (R_m) του κονιάματος για το χαρακτηρισμό της αυτοσυμπυκνωσιμότητας του ΑΣΣ/ΑΣΚ. Παράδειγμα αποτελεί η δημιουργία του διαγράμματος που παρουσιάζεται στην

Εικόνα 1-7, όπως έχει προκύψει από τους Okamura&Ouchi, με τη μαύρη κουκκίδα να αντιστοιχεί στο συνδυασμό χαρακτηριστικών ενός μίγματος με βέλτιστη αυτοσυμπυκνωσιμότητα[6]. Ωστόσο, τέτοιου είδους παρουσιάζουν ανεπαρκή συσχέτιση και για το λόγο αυτό δημιουργείται η ανάγκη ανάπτυξης πιο σύνθετων ρεολογικών μοντέλων [32].



Εικόνα 1-9. Συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών ρευστότητας του μίγματος και της αυτοσυμπυκνωσιμότητάς του.

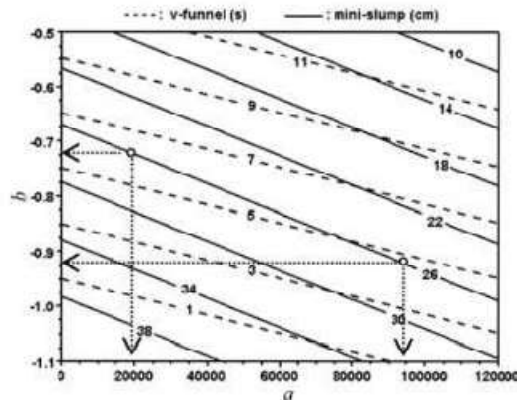
Οι Bouziani & Benmounah[33] κατασκεύασαν ένα νομογράφημα (**Εικόνα 1-8**), από το οποίο προσδιορίζονται η διάμετρος εξάπλωσης καθώς και ο χρόνος εκκένωσης της χοάνης Νενός ΑΣΣ/ΑΣΚ έχοντας ως δεδομένο το ιξώδες του μίγματος. Πιο συγκεκριμένα, συσχέτισαν επιτυχώς, και μέσω γραμμικών σχέσεων τους συντελεστές ροής (b) και συνεκτικότητας (a), οι οποίοι περιγράφουν το ιξώδες σύμφωνα με τη σχέση 1.8, με τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών εξάπλωσης σύμφωνα με τις σχέσεις 1.9 & 1.10:

$$\mu = a\gamma^b \quad (1.8)$$

$$V - funnel (s) = 19,9 + 0,000033 a + 19,9 b \quad (1.9)$$

$$mini - slump (cm) = -0,0001 a - 38,4 b \quad (1.10)$$

όπου, μ το ιξώδες, γ η περιστροφική ταχύτητα που εφαρμόζεται κατά τη ρεομέτρηση, a ο συντελεστής συνεκτικότητας, και b ο συντελεστής ροής του μίγματος.



Εικόνα 1-10. Νομογράφημα συσχέτισης μεταξύ δοκιμών εξάπλωσης και εκκένωσης χοάνης V με τους συντελεστές ροής (b) και συνεκτικότητας (a).

Ακολούθως, οι Bouvetetal.[34] επιχειρώντας να διαμορφώσουν ένα πιο γενικευμένο και μικρότερης ευαισθησίας στις αλλαγές μοντέλο πρόβλεψης των τάσεων διαρροής του νωπού μίγματος ΑΣΣ/ΑΣΚ αξιοποιώντας δεδομένα πειραματικών δοκιμών και αριθμητικών προσομοιώσεων, κατέγραψαν διάφορα αναλυτικά μοντέλα. Αρχικά, οι Okadoetal.[35], υπό τη θεώρηση ότι το μίγμα ρέει μόνο υπό την επίδραση του βάρους του, συσχέτισαν την τάση διαρροής με τον όγκο του κώνου της μικρής δοκιμής εξάπλωσης, V_c , μέσω της σχέσης:

$$\tau_0 = \frac{225 g \rho V_c^2}{4\pi^2 D_f^5} \quad (1.11)$$

όπου, τ_0 το όριο διαρροής του νωπού μίγματος, g ο συντελεστής βαρύτητας, ρ η πυκνότητα του νωπού μίγματος, V_c ο όγκος του κώνου εξάπλωσης, και D_f η τελική διάμετρος εξάπλωσης.

Ακόμη, οι Rousel & Coussot [36] επιχειρώντας να βελτιώσουν και να εξελίξουν το μοντέλο των Bouvetetal., ούτως ώστε να δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, έλαβαν υπόψη τις διατμητικές τάσεις που παρουσιάζονται στα μίγματα ΑΣΣ/ΑΣΚ και εισήγαγαν την έννοια της επιφανειακής τάσης στο προτεινόμενο μοντέλο τους:

$$\tau_0 = \frac{1 D_f}{4 V_c} \left(\frac{225 g \rho V_c^3}{\pi^2 D_f^7} - \lambda \right) \quad (1.12)$$

όπου, λ ο συντελεστής συνάρτησης της άγνωστης επιφανειακής τάσης του ρευστού, και της γωνίας επαφής.

Τέλος, ένα διαφορετικό ρεολογικό μοντέλο προτάθηκε από τους Treggeretal.[37]. Το εν λόγω μοντέλο περιγράφει τη σχέση μεταξύ της τάσης διαρροής, τ_0 , όπως αυτή μετριέται σε ένα

ομόκεντρο κυλινδρικό ροόμετρο, και της τελικής διαμέτρου της εξαπλωμένης πάστας, σύμφωνα με τη σχέση;

$$\tau_0 = \frac{2,75 \cdot 10^{-9}}{D_f^{5,81}} \quad (1.12)$$

ενώ, παράλληλα, στην περίπτωση δεδομένου χρόνου της εξάπλωσης, T_f , προβλέπει και το πλαστικό ιξώδες, μ_0 , του νωπού μίγματος ΑΣΣ/ΑΣΚ σύμφωνα με τη σχέση:

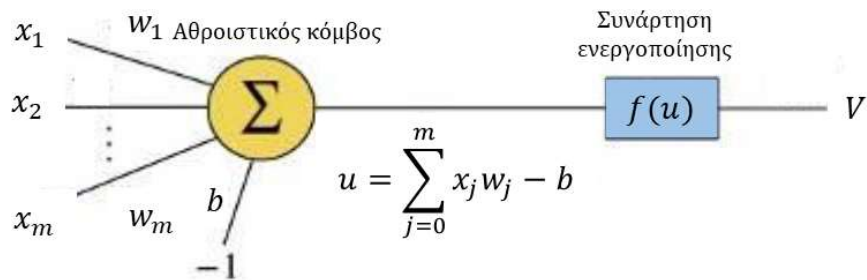
$$\mu_0 = \tau_0(6,41 T_f - 1,94)10^{-3} \quad (1.13)$$

1.3 ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) αποτελούν μια κατηγορία αλγορίθμων μηχανικής μάθησης εμπνευσμένα από τον τρόπο λειτουργίας των βιολογικών νευρώνων. Στον βιολογικό εγκέφαλο, οι νευρώνες ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσω ηλεκτρικών και χημικών σημάτων. Ομοίως, στα ΤΝΔ, οι τεχνητοί νευρώνες διαμετακομίζουν πληροφορίες μέσω μαθηματικών συναρτήσεων, με κάθε νευρώνα να λαμβάνει και να επεξεργάζεται μια ή περισσότερες εισόδους, και να παράγει μια έξοδο. Ένα ΤΝΔ μπορεί να έχει από μερικές εκατοντάδες έως και δισεκατομμύρια τέτοιους νευρώνες [38].

Ο νευρώνας, όπως και στην περίπτωση των βιολογικών νευρώνων, αποτελείθεμελιώδεςδομικόστοιχείο των ΤΝΔ. ο οποίος λαμβάνει το δεδομένο εισόδου, εκτελεί μια λειτουργία επεξεργασίας/υπολογισμού, και ακολούθως, παράγει ένα αποτέλεσμα εξόδου. Η έξοδος ενός νευρώνα μπορεί να διατεθεί σαν αποτέλεσμα ή ακόμη να αποτελέσει δεδομένο εισόδου σε έναν άλλο νευρώνα του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε νευρώνας του ΤΝΔ, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 1-11**, περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά εισόδου x_j , $j = 1, 2, \dots, m$, το σύνολο των οποίων αποτελεί το δεδομένο εισόδου αναπαριστώμενο από ένα διάνυσμα, το βάρος w_j που αντιστοιχεί σε κάθε χαρακτηριστικό εισόδου, και τον δείκτη μεροληψίας b (bias). Όλα τα σήματα εισόδου πολλαπλασιαζόμενα από τα αντίστοιχα βάρη τους προστίθενται μέσω μιας γραμμικής λειτουργίας σύμφωνα με τη σχέση:

$$u = \sum_{j=0}^m x_j w_j - b \quad (1.13)$$



Εικόνα 1-11. Σχηματική απεικόνιση τεχνητού νευρώνα.

Στη συνέχεια, η έξοδος, V , του νευρώνα προκύπτει από τη συνάρτηση ενεργοποίησης f σύμφωνα με τη σχέση:

$$V = f(u) \quad (1.14)$$

Η συνάρτηση ενεργοποίησης εισάγει στα ΤΝΔ την έννοια της μη γραμμικότητας, καθιστώντας με αυτό τον τρόπο δυνατή την επίλυση σύνθετων και πολύπλοκων προβλημάτων. Τυπικές επιλογές συναρτήσεων ενεργοποίησης είναι, μεταξύ άλλων[39]:

- η σιγμοειδής συνάρτηση με τύπο:

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (1.15)$$

η οποία βρίσκει ευρεία χρήση, με το αποτέλεσμα εξόδου να λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1.

- η συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης με τύπο:

$$f(u) = \tanh(u) \quad (1.16)$$

η οποία βρίσκει είναι παρόμοια με τη σιγμοειδή, αλλά το αποτέλεσμα εξόδου λαμβάνει τιμές μεταξύ -1 και 1, προσφέροντας ένα μεγαλύτερο εύρος.

- Η συνάρτηση ReLU (Rectified Linear Unit) με τύπο:

$$f(u) = \max(0, u) \quad (1.17)$$

η οποία επιστρέφει τη μέγιστη τιμή μεταξύ της τιμής εισόδου και του 0, και έχει την τάση να συμβάλει στην επιτάχυνση της εκπαίδευσης του δικτύου.

Η δόμηση των ΤΝΔ πραγματοποιείται σε επίπεδα (layers) τα οποία διακρίνονται στο επίπεδο των εισερχόμενων δεδομένων, ένα ή περισσότερα επίπεδα κρυφών επιπέδων, και το

επίπεδο εξερχόμενων δεδομένων. Ο αριθμός των κρυφών επιπέδων καθορίζει το βάθος (depth) του δικτύου, ενώ το πλήθος των νευρώνων ανά επίπεδο ορίζουν το πλάτος (width) του δικτύου[38-40].

Η έξοδος ενός νευρώνα μπορεί να διατεθεί σαν αποτέλεσμα ή ακόμη να αποτελέσει δεδομένο εισόδου σε έναν άλλο νευρώνα του δικτύου. Επιπλέον, αναφορικά με τη συνδεσμολογία των νευρώνων, ένας νευρώνας του n κρυφού επιπέδου λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου τα δεδομένα εξόδου όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου $n-1$ με τους οποίους συνδέεται πλήρως. Η διαμόρφωση των μεγεθών του μήκους και πλάτους καθώς και η επιλογή της συνάρτησης ενεργοποίησης συνθέτουν και καθορίζουν την αρχιτεκτονική του ΤΝΔ, η οποία δεν είναι αυστηρά προκαθορισμένη και εναπόκειται στο σχεδιαστή να την επιλέξει με βάση τον σκοπό της εφαρμογής. Η επιλογή της κατάλληλης αρχιτεκτονικής βασίζεται στην εμπειρία του σχεδιαστή και στην κατανόηση του συγκεκριμένου προβλήματος που τίθεται προς λύση. Επιπλέον, οι δείκτες μεροληψίας και τα βάρη αποτελούν τις παραμέτρους του ΤΝΔ, οι οποίες κατά την εκπαίδευση του αλγορίθμου αναπροσαρμόζονται συνεχώς με στόχο την κατάλληλη γραμμική διασύνδεση των νευρώνων. Η προσαρμογή, ωστόσο, των παραμέτρων με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια απαιτεί τον ορισμό επιπρόσθετων παραμέτρων οι οποίοι δεν σχετίζονται με την αρχιτεκτονική του ΤΝΔ και καλούνται υπερπαραμέτροι[38-40].

Οι υπερπαραμέτροι καθορίζονται πριν τη διαδικασία εκπαίδευσης και συμβάλλουν στην επίδοση εξεταζόμενου μοντέλου. Στις κύριες υπερπαραμέτρους συγκαταλέγονται[40]:

- ο ρυθμός εκμάθησης (α): Πρόκειται για το μέγεθος του βήματος, δηλαδή πόσο γρήγορα ή αργά επιτυγχάνεται η διαδικασία ενημέρωσης των βαρών κατά την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Πολύ υψηλοί ρυθμοί μπορεί να οδηγήσουν σε ασταθή εκπαίδευση του αλγορίθμου, ενώ εξαιτίας πολύ χαμηλών ρυθμών μπορεί να προκύψει αργή σύγκλιση ή τοπικά ελάχιστα.
- το μέγεθος δέσμης (batchsize): Πρόκειται για τον αριθμό των δεδομένων εκπαίδευσης και επικύρωσης που εισέρχονται κάθε φορά στον αλγόριθμο εκμάθησης. Το μέγεθος δέσμης σχετίζεται με την ταχύτητα εκπαίδευσης και η ολοκλήρωση της εισροής των εν λόγω παραμέτρων συνεπάγεται την ολοκλήρωση μιας επανάληψης/εποχής εκπαίδευσης.
- ο αριθμός εποχών (epochs): Πρόκειται για τις φορές που τα δεδομένα εκπαίδευσης

διέρχονται από το ΤΝΔ, ο αριθμός των οποίων μπορεί να επηρεάσει την εκπαίδευσης αλλά και να συνδεθεί με φαινόμενα υπερεκπαίδευσης.

Αναφορικά με το στάδιο της εκπαίδευσης, αυτή αποτελεί ουσιαστικά μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλονται οι παράμετροι (βάρη, δείκτες μεροληψίας) με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Οι τεχνικές εκπαίδευσης ενός ΤΝΔ διακρίνονται κατά κύριο λόγο σε τρεις κατηγορίες:

- **Επιτηρούμενη μάθηση (Supervised Learning):** Αποτελεί τον τρόπο εκπαίδευσης στις περισσότερες υλοποιήσεις ΤΝΔ, σκοπός είναι η βέλτιστη προσέγγιση μιας συνάρτησης που συνδέει τις μεταβλητές εισόδου με τα αποτελέσματα εξόδου. Τα δεδομένα εκπαίδευσης αποτελούνται από μεταβλητές εισόδου και τις ανάλογες τιμές εξόδου. Κατά τη διαδικασία της εκμάθησης το ΤΝΔ χρησιμοποιώντας τις δοθείσες τιμές αναπροσαρμόζει τις εσωτερικά του μεγέθη (weights, bias) με σκοπό την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων που έχουν δοθεί. Στη συγκεκριμένη μέθοδο έχει αποδοθεί ο τίτλος επιτηρούμενη μάθηση καθώς προσομοιάζει την διαδικασία επίβλεψης που ασκεί ένας καθηγητής σε έναν μαθητευόμενο. Η μέθοδος αποτελεί κατάλληλη επιλογή για προβλήματα παλινδρόμησης (regression) και κατηγοριοποίησης (classification).
- **Μη επιτηρούμενη μάθηση (Unsupervised Learning):** Σκοπός της μεθόδου αποτελεί ο εντοπισμός υποκείμενων μοτίβων και η κατανόηση ενός συνόλου δεδομένων χωρίς την παρουσία αποτελεσμάτων ή επιτήρησης. Η απουσία γνωστών αποτελεσμάτων ή ο μεγάλος δείκτης τυχαιότητας γύρω από ένα πεδίο μελέτης μπορεί να οδηγήσει στη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου. Προβλήματα συσχέτισης ή ομαδοποίησης (clustering) συχνά αντιμετωπίζονται με χρήση μη επιτηρούμενης μάθησης.
- **Ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning):** Βασικός στόχος της μεθόδου αποτελεί ο προσδιορισμός των ενεργειών που επιφέρουν την υψηλότερη ανταμοιβή και το χαμηλότερο ρίσκο με βάση τη συσσωρευμένη εμπειρία. Αποτελείται από τρία στοιχεία, τον αλγόριθμο εκμάθησης, το περιβάλλον μέσα στο οποίο διενεργεί ο αλγόριθμος και τις ενέργειες τις οποίες πραγματοποιεί. Ο αλγόριθμος συγκεντρώνει παρατηρήσεις για το περιβάλλον και επανειλημμένος εκτελεί τη βέλτιστη ενέργεια με βάση τη εμπειρία που έχει συλλέξει από προηγούμενες ενέργειες.

Ακόμη, σημαντικός όρος αποτελεί η συνάρτηση κόστους/βελτιστοποίησης, η οποία υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής και της τιμής που προβλέπει το μοντέλο, και αναλαμβάνει ενεργό ρόλο κατά την εκπαίδευση και την προσαρμογή των υπερπαραμέτρων. Ευρέως γνωστές συναρτήσεις βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται κατά την εκμάθηση ΤΝΔ αποτελούν οι Adam (Adaptive Moment Estimation), RMSprop (Root Mean Square Propagation), SGD (Stochastic Gradient Descent) κ.α.

Πέραν από την επιλογή των παραμέτρων και υπερπαραμέτρων του ΤΝΔ που αποτελούν σημαντικό παράγοντα για τη ορθή εξαγωγή αποτελεσμάτων, εξέχουσας σημασίας είναι η αναγνώριση και αντιμετώπιση προβλημάτων που προκύπτουν κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης του. Παρακάτω αναλύονται τα δύο επικρατέστερα προβλήματα που συναντάμε κατά την εκμάθηση ενός ΤΝΔ:

- Υπερπροσαρμογή (overfitting): Επεξηγείται ως το πρόβλημα της δημιουργίας ενός μοντέλου που αντιστοιχεί με υπερβολική ακρίβεια σε ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων αδυνατώντας όμως να γενικεύσει τα αποτελέσματά του σε νέα άγνωστα δεδομένα. Το φαινόμενο παρουσιάζεται, κατά κύριο λόγο, σαν αποτέλεσμα υπερεκπαίδευσης (overtraining) του μοντέλου. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος, παραδείγματα αποτελούν η ομαλοποίηση (regularization) των δεδομένων και ο πρόωρος τερματισμός της εκπαίδευσης (early stopping).
- Υποπροσαρμογή (underfitting): Περιγράφει την αδυναμία του μοντέλου να αφομοιώσει τη δομή και τις συσχετίσεις μεταξύ των δεδομένων που του παρέχονται. Αποτελεί αντίστροφο πρόβλημα της υπερπροσαρμογής και τα κυριότερα πιθανά αίτια εμφάνισης του αποτελούν η πρόωρη διακοπή της εκπαίδευσης του μοντέλου, το μικρό πλήθος των δεδομένων εκπαίδευσης σε συνάρτηση με την πολυπλοκότητα του προβλήματος αλλά και η ακατάλληλη επιλογή αρχιτεκτονικής και υπερπαραμέτρων του μοντέλου από το σχεδιαστή.

Συνολικά, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν πολύπλοκες δομές που απαιτούν λεπτομερή κατανόηση και προσαρμογή για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης στην διεξαγωγή μιας μελέτης. Η διαμόρφωση της αρχιτεκτονικής, η επιλογή κατάλληλων παραμέτρων και υπερπαραμέτρων καθώς και η ορθή αντιμετώπιση των προβλημάτων

εκπαίδευσης αποτελούν κρίσιμα βήματα για την επιτυχία του συστήματος.

1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, τα μίγματα ΑΣΣ και ΑΣΚ αποτελούν δημοφιλείς επιλογές δομικών υλικών με συγκεκριμένες ρεολογικές ιδιότητες, οι οποίες τα καθιστούν συμπακνώσιμα. Ωστόσο, δεν υπάρχουν συγκεκριμένα πρότυπα για το σχεδιασμό τους παρά μόνο κάποιες κατευθυντήριες οδηγίες. Στην παρούσα μελέτη επιχειρήθηκε να διερευνηθεί η δυνατότητα επίλυσης ενός προβλήματος όπως είναι ο χαρακτηρισμός περιπτώσεων ΑΣΣ ή ΑΣΚ και η αναγνώριση αν πρόκειται για αυτοσυμπυκνούμενα μίγματα με τη χρήση της μεθόδου των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η ανάπτυξη και βελτιστοποίηση ενός μοντέλου πρόβλεψης για την αξιολόγηση της καταλληλότητας εξεταζόμενων συνθέσεων να αποτελέσουν αυτοσυμπυκνούμενα μίγματα.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας διεξήχθη αρχικά μια βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τις μεθοδολογίες σχεδιασμού μιγμάτων ΑΣΣ και κονιάματος, τις μεθοδολογίες σχεδιασμού νευρωνικών δικτύων, καθώς και την εφαρμογή μοντέλων πρόβλεψης τεχνητών νευρωνικών δικτύων στην τεχνολογία σκυροδέματος και κονιάματος, όπως παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 2. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η συλλογή και κατάταξη των δεδομένων (βιβλιογραφικά και πειραματικά), καθώς και η διαδικασία εκπαίδευσης και βελτιστοποίησης της αρχιτεκτονικής του μοντέλου, και η τελική επιλογή του βέλτιστου μοντέλου, όπως παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3. Ακολούθως, στο κεφάλαιο 4 παρατίθενται τα αποτελέσματα αναφορικά με την αξιολόγηση της σημαντικότητας των εξεταζόμενων μεταβλητών στο σχεδιασμό των αυτοσυμπυκνούμενων μιγμάτων, ενώ στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ΑΣΣ το καθιστούν ένα δημοφιλές δομικό υλικό και κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές στον τομέα της κατασκευής και της δομικής μηχανικής. Ωστόσο, η διαδικασία σύνθεσής του υλικού απαιτεί ακρίβεια και επιμέλεια, και βασίζεται σε ερευνητικές μελέτες και πρακτικές.

Δεδομένου του πολυπαραμετρικού χαρακτήρα της τελικής σύνθεσης του ΑΣΣ, δεν υπάρχει συγκεκριμένη συνταγή για την ιδανική του σύνθεση. Πολλές ερευνητικές ομάδες, εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος και άλλες βιομηχανικές μονάδες έχουν αναπτύξει τις δικές τους μεθόδους για την παραγωγή ΑΣΣ, με βάση τις ειδικές ανάγκες και απαιτήσεις τους. Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των μεθόδων είναι ότι θεωρούνται επιτυχείς μόνο όταν το τελικό προϊόν έχει περάσει όλα τα απαραίτητα εργαστηριακά τεστ, τόσο στη νωπή όσο και στη σκληρή του κατάσταση. Στην πραγματικότητα, το κύριο στοιχείο που συνεισφέρει στην επιτυχία είναι η σωστή επιλογή και ο συνδυασμός των βασικών συστατικών, δεδομένου ότι η κατάλληλη διαμόρφωση της πάστας του σκυροδέματος θεωρείται ζωτικής σημασίας. Για αυτό το λόγο, πολλές από αυτές τις μεθόδους ξεκινούν με τη βελτιστοποίηση της ροής και της σταθερότητας της βασικής πάστας, πριν προστεθούν τα χονδρόκοκκα αδρανή και διεξαχθούν οι τελικές δοκιμές.

Σύμφωνα με τις Κατευθυντήριες Οδηγίες, υπάρχει μια βασική διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για την παραγωγή ΑΣΣ. Αυτή περιλαμβάνει την αρχική εργαστηριακή αξιολόγηση και πιστοποίηση των υλικών και της σύνθεσης, καθώς και τις απαραίτητες τροποποιήσεις, ανάλογα με τα αποτελέσματα. Το τελικό προϊόν πρέπει στη συνέχεια να υποβληθεί σε πλήρεις εργαστηριακές δοκιμές, τόσο στη νωπή όσο και στη σκληρή του κατάσταση, προτού χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές κατασκευής[8].

Βασιζόμενοι στις αρχές σχεδιασμού του ΑΣΣ, οι μέθοδοι μπορούν να διακριθούν σε μεθόδους [16]:

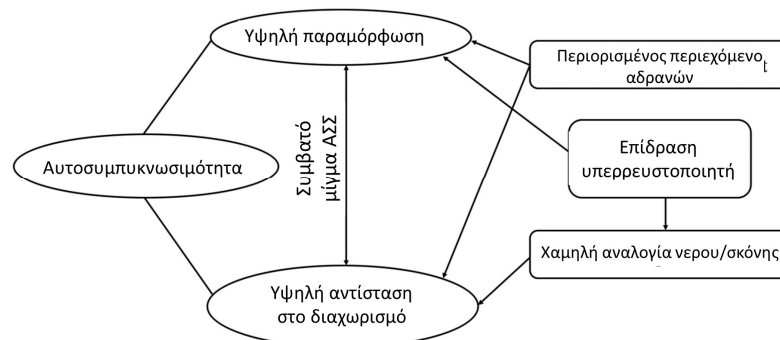
- Εμπειρικού σχεδιασμού
- Βασισμένες στη βέλτιστη πυκνότητα στοίβαξης

- Βασισμένες στη θλιπτική αντοχή
- Βασισμένες σε μοντέλο της ρεολογίας της πάστας
- Βασισμένες σε στατιστικό παραγοντικό μοντέλο

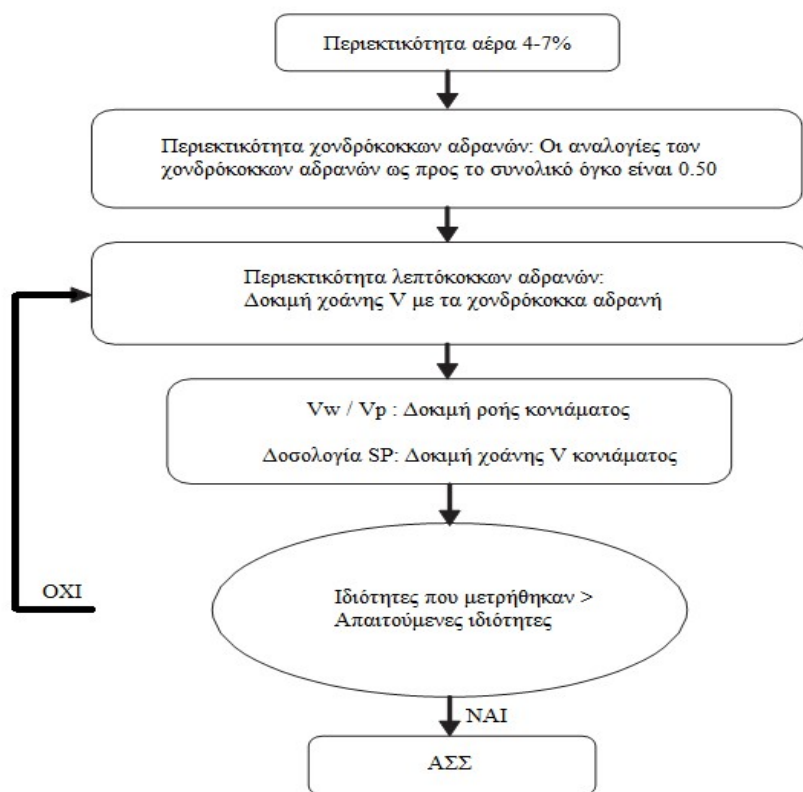
2.1.1 Μέθοδοι Εμπειρικού Σχεδιασμού

Οι εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού βασίζονται σε εμπειρικά δεδομένα αναφορικά με τις αρχικές συστάσεις και τις αναλογίες των μιγμάτων στα επιμέρους συστατικά του ΑΣΣ, όπως το νερό, το τσιμέντο, τα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή, τον υπερρρευστοποιητή, και εν συνεχεία ακολουθείται ένα επαναλαμβανόμενο βήμα δοκιμής-σφάλματος με στόχο την κατάλληλη προσαρμογή των αναλογιών του υλικού, και συνεπακόλουθα βελτιστοποίηση του μίγματος ΑΣΣ.

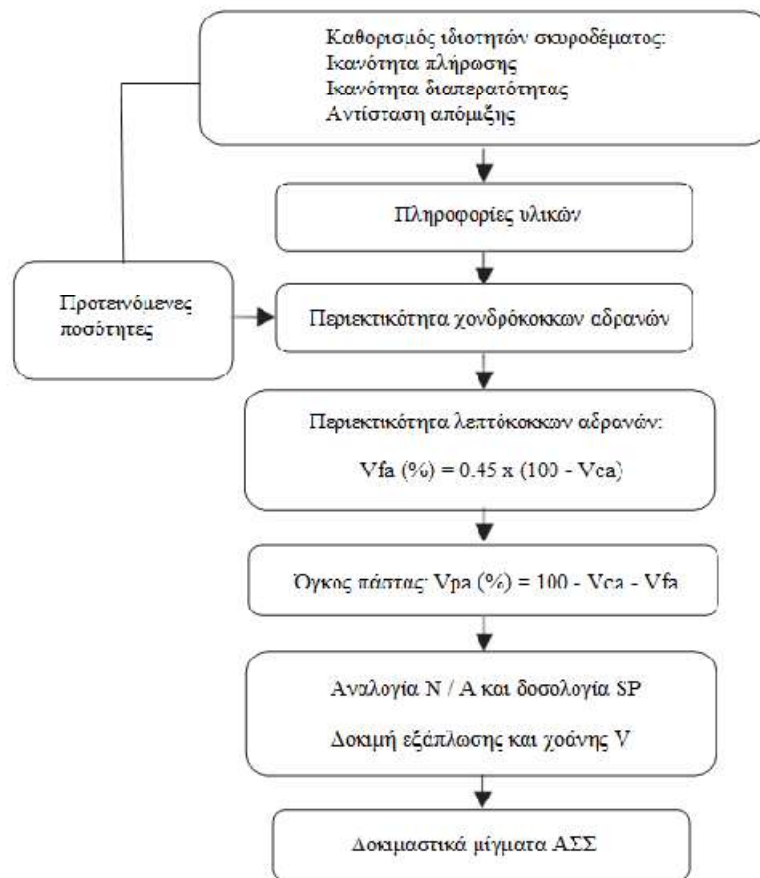
Στις ακόλουθες **Εικόνες 2-1 – 2-3** παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ σύμφωνα με τις μελέτες των Okamura&Ozawa, Edamatsuetal. και Domone[41-43].



Εικόνα 2-1. Προτεινόμενη μεθοδολογία επίτευξης ΑΣΣ σύμφωνα με τους Okamura&Ozawa[43].



Εικόνα 2-2. Μεθοδολογία σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Edamatsu et al. [42].



Εικόνα 2-3. Μέθοδος UCL για το σχεδιασμό μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τον Domone[41].

Πλεονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων αποτελεί η απλότητα και η λιγότερο σύνθετη φύση τους. Ωστόσο, απαιτούν μεγάλο όγκο εντατικών εργαστηριακών δοκιμών και μεγάλο αριθμό επαναλήψεων των βημάτων του αλγορίθμου που επικεντρώνεται στην προσαρμογής των κατάλληλων αναλογιών των υλικών ούτως ώστε να προκύψει ένα μίγμα ΑΣΣ με τις επιθυμητές ιδιότητες[16].

2.1.2 Μέθοδοι Βασισμένες στη Βέλτιστη Πυκνότητα Στοιβαξης

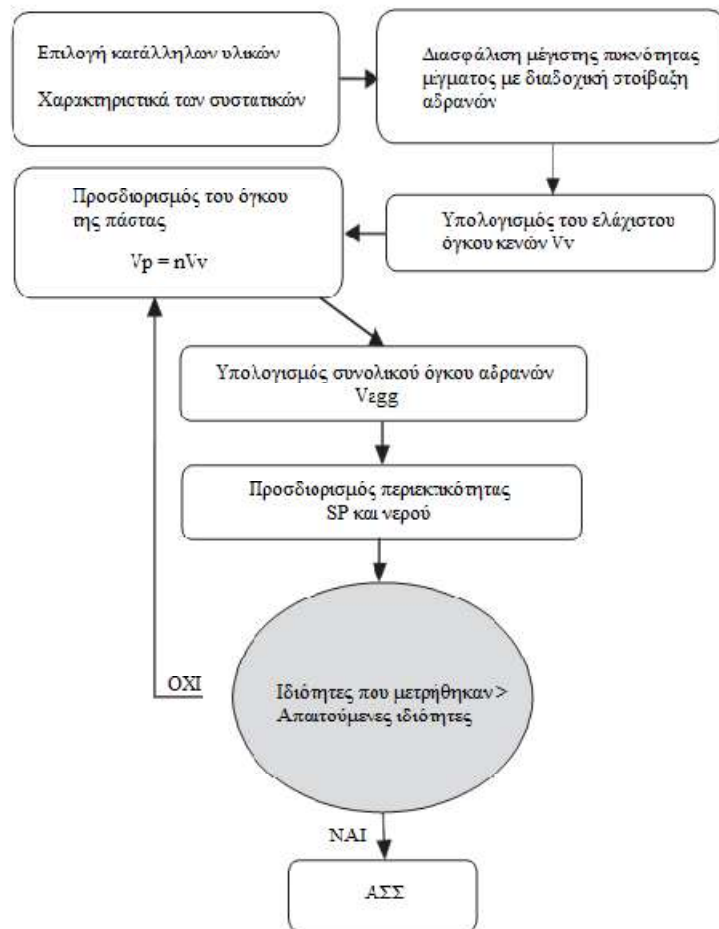
Η στοιβαξη των σωματιδίων συμβάλλει στη διαμόρφωση της πυκνότητας του μίγματος ΑΣΣ, και επηρεάζεται από παράγοντες όπως η μορφολογία των σωματιδίων, και η επιφάνειά τους, η ποσότητα του νερού, και η εφαρμοζόμενη ενέργεια συμπίεσης. Τα μίγματα με στερεά μεγαλύτερης στοιβαξης παρουσιάζουν σχετικά χαμηλότερο ιξώδες, με το νερό να λειτουργεί σαν λιπαντικό μέσο. Όπως αποδεικνύεται, η στοιβαξη των σωματιδίων επηρεάζει την εργασιμότητα του σκυροδέματος, η οποία και βελτιώνεται στην περίπτωση υψηλότερου

βαθμού στοίβαξης των σωματιδίων, προσφέροντας βελτιωμένη εργασιμότητα του νωπού ΑΣΣ [44].

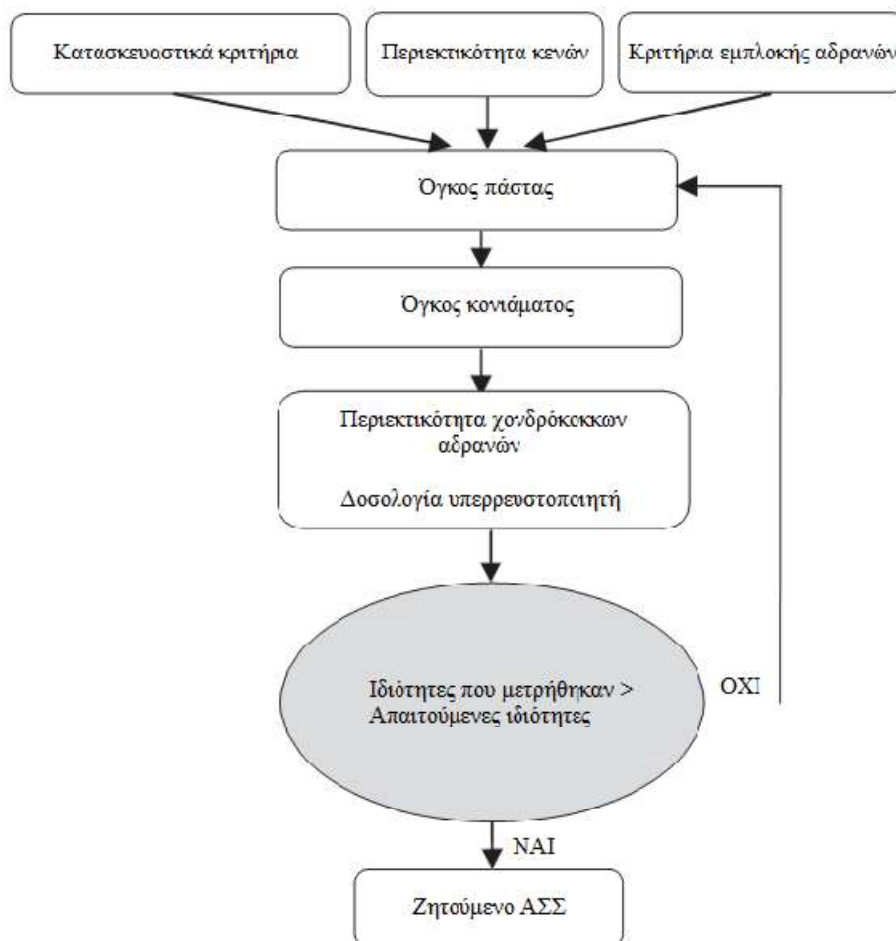
Σε αυτή τη μεθοδολογία πραγματοποιείται καθορισμός των επιμέρους συστατικών του μίγματος με κριτήριο την επίτευξη του ελάχιστου δυνατού κενού μεταξύ των αδρανών. Για το σκοπό αυτόν γίνεται χρήση κατάλληλων μοντέλων στοίβαξης.

Μεταξύ των μεθοδολογιών που έχουν αναπτυχθεί και μελετηθεί αναφέρεται ενδεικτικά ο αλγόριθμος Densified Mixture Design Algorithm (DMDA) (**Εικόνα 2-4**) [45]. Η διαμόρφωση της μεθοδολογίας βασίστηκε στη θεωρία μέγιστης πυκνότητας και τη θεωρία περί υπερβολικής πάστας και επετεύχθη ελαχιστοποίηση της ποσότητας του νερού και του τσιμέντου κάνοντας χρήση ιπτάμενης τέφρας στο ρόλο του πληρωτικού μέσου του κενού. Παρότι το μίγμα ΑΣΣ που προκύπτει από αυτή τη μεθοδολογία παρουσιάζει θετικά χαρακτηριστικά αναφορικά με την απόδοση, την ανθεκτικότητά του, και αποτελεί ένα οικονομικό προϊόν, η μέθοδος δεν προσφέρει αρκετές πληροφορίες αναφορικά με την αντίσταση απόμιξης, και την ικανότητα διέλευσης και του ΑΣΣ μεταξύ των οπλισμών.

Ωστόσο, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Peterssonetal. [46] (**Εικόνα 2-5**) λαμβάνει υπόψη την εμπλοκή των αδρανών (δείκτης εμπλοκής), και τη σχέση του μεγέθους των αδρανών και της απόστασης μεταξύ των ράβδων του οπλισμού. Ο σχεδιασμός του μίγματος, αν και αξιόλογος, είναι εφαρμόσιμος για συγκεκριμένη διάταξη οπλισμού κάθε φορά, και για το λόγο αυτό δεν είναι τόσο προσιτή και εύκολα εφαρμόσιμη μέθοδος. Παραδείγματα άλλων μελετών που κάνουν χρήση ανάλογων μεθοδολογιών συμπεριλαμβάνονται στον **Πίνακα 2-1**.



Εικόνα 2-4. Μέθοδος DMDA για το σχεδιασμό μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Hwangetal.[45].

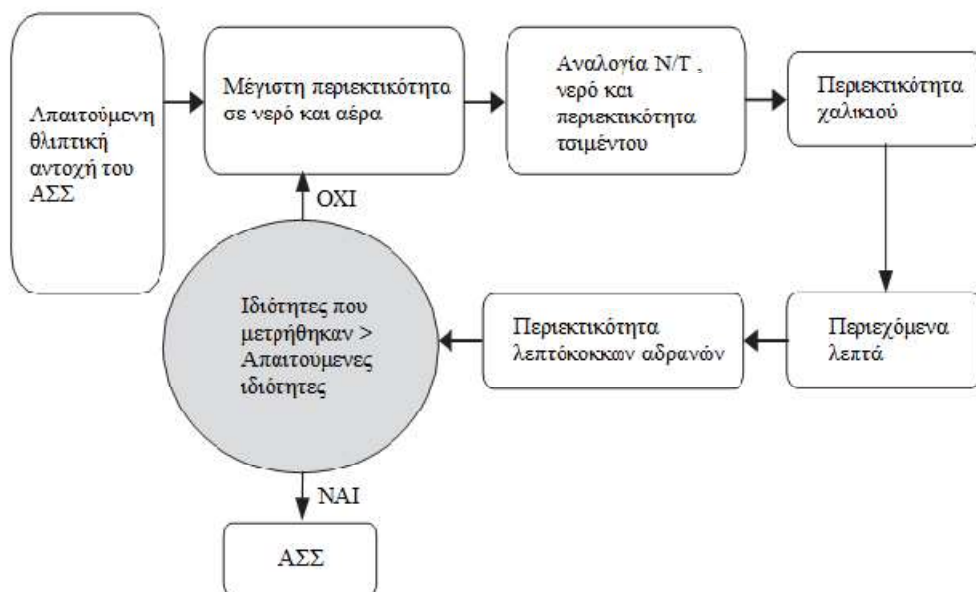


Εικόνα 2-5. Μεθοδολογία σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Peterssonetal. [46].

2.1.3 Μέθοδοι Βασισμένες στη Θλιπτική Αντοχή

Όπως προκύπτει και από το όνομά τους, στις εν λόγω μεθόδους η διαμόρφωση της περιεκτικότητας του ΑΣΣ σε τσιμέντο, αδρανή, και πρόσθετα υλικά πραγματοποιείται με κριτήριο την αντοχή του στη θλίψη.

Η εν λόγω μεθοδολογία θεωρείται απλή, και ελαχιστοποιεί την ανάγκη για δοκιμαστικά μίγματα, καθορίζοντας μια διαδικασία που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη σαφήνεια και ακρίβεια κατά την επιλογή των ποσοτήτων των επιμέρους συστατικών του ΑΣΣ. Παρόλα αυτά, σχετίζεται με την απαίτηση προσαρμογής όλων των συστατικών για την επιλογή της βέλτιστης αναλογίας μίγματος [16]. Ενδεικτική μεθοδολογία παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2-6**.



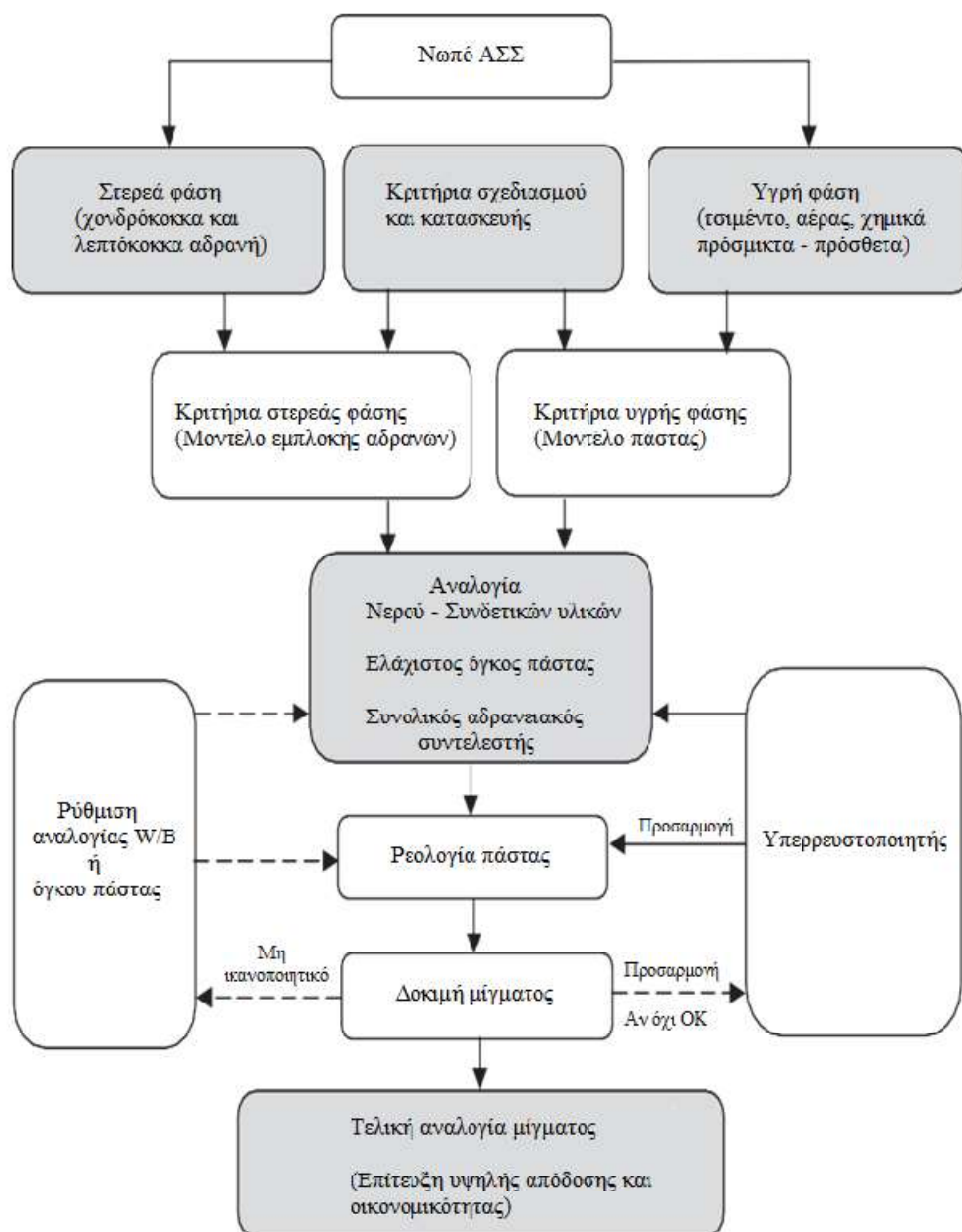
Εικόνα 2-6. Μεθοδολογία σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Peterssonetal.[47].

2.1.4 Μέθοδοι Βασισμένες σε Μοντέλο Ρεολογίας της Πάστας

Η λογική του συγκεκριμένου τύπου μεθοδολογίας βασίζεται στην ιδιότητα αντίστασης στην απόμιξη και την εργασιμότητα του νωπού ΑΣΣ. Η εργασιμότητα του ΑΣΣ εξαρτάται από τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του κονιάματος, καθώς και από της φυσικές ιδιότητες του αμμοχάλικου.

Κατά τη συγκεκριμένη μεθοδολογία οι επιλεγμένες παράμετροι προσαρμόζονται με σκοπό την επίτευξη επιθυμητών ρεολογικών ιδιοτήτων (τάση διαρροής και ιξώδες). Παράλληλα, η διαμόρφωση μιας ελάχιστης τιμής ιξώδους και τάσης διαρροής του μίγματος συμβάλλει στην αποφυγή του φαινομένου απόμιξης. Οι παράμετροι που μελετώνται σε αυτή τη μέθοδο είναι, μεταξύ άλλων, ο όγκος και η κατανομή μεγέθους των αδρανών, και ο λόγος των λεπτόκοκκων προς τα χονδρόκοκκα αδρανή. Οι παράμετροι αυτοί και η μορφολογία των αδρανών διαμορφώνουν τη μέση διάμετρο των αδρανών και συνεπακόλουθα διαμορφώνει το ποσοστό κενού στη μάζα των αδρανών. Η μεθοδολογία αυτή, επομένως, μελετά τον ελάχιστο όγκο της τσιμεντόπαστας ούτως ώστε να πληρωθεί το εν λόγω κενό και να εξασφαλιστούν τα απαιτούμενα επίπεδα παραμορφωσιμότητας και αντίστασης στην απόμιξη. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η βασισμένη σε μοντέλο ρεολογίας μεθοδολογία σχεδιασμού ΑΣΣ, όπως προτείνεται από τους Buietal. (Εικόνα 2-7)[48].

Η επιλογή της εν λόγω μεθοδολογίας συμβάλλει στην εξοικονόμηση των απαιτούμενων πρώτων υλών, χρόνου και όγκου των εργαστηριακών πειραμάτων, διαμορφώνοντας παράλληλα μια βάση για την ανάπτυξη αλλά και τον ποιοτικό έλεγχο νέων προϊόντων [16].



Εικόνα 2-7. Μεθοδολογία σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ, σύμφωνα με τους Buietal. [48].

2.1.5 Μέθοδοι Βασισμένες σε Στατιστικό Παραγοντικό Μοντέλο

Τέλος, τα μοντέλα που βασίζονται στη χρήση της παραγοντικής προσέγγισης

εφαρμόζονται ως ένα αποτελεσματικό μέσο για τον προσδιορισμό της επίδρασης ορισμένων βασικών επιλεγμένων μεταβλητών στις ιδιότητες του ΑΣΣ. Η εφαρμογή στατιστικών παραγοντικών μοντέλων συμβάλλει στη βελτιστοποίηση του εκάστοτε εξεταζόμενου μίγματος ΑΣΣ, με ταυτόχρονη μείωση του αριθμού των απαιτούμενων δοκιμών, απλοποιώντας τη διαδικασία σχεδιασμού. Η χρήση τους οδηγεί στον προσδιορισμό της επίδρασης των εξεταζόμενων παραμέτρων και των συνδυαστικών επιδράσεων τους στις ιδιότητες του ΑΣΣ.

Μια κατηγορία παραγοντικού σχεδιασμού που έχει εφαρμοσθεί σε αυτήν την περίπτωση είναι η μέθοδος Taguchi. Πρόκειται για μια μέθοδο ορθογώνιου πειραματικού σχεδιασμού που στοχεύει στη βελτιστοποίηση των μεταβλητών ελέγχου, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό στοχευμένο αποτέλεσμα. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει το πλεονέκτημα ελαχιστοποίησης της μεταβλητότητας των παραμέτρων όσο η απόδοση του μίγματος συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή.

Σε αυτήν την κατηγορία έχουν μελετηθεί ποικίλες ανεξάρτητες παράμετροι, όπως οι ποσότητες τσιμέντου, τέφρας, υπερρευστοποιητή, η αναλογία νερού/τσιμέντου, η περιεκτικότητα νερού, οι διαφορετικοί τύποι άμμου, ο λόγος του όγκου των υλικών σκόνης προς τον όγκο των λεπτών αδρανών, ο λόγος του όγκου νερού προς όγκο των υλικών σκόνης κ.α., εξετάζοντας την επίδρασή τους στις ιδιότητες του νωπού μίγματος, όπως την ικανότητα πλήρωσης και διέλευσης, και την αντίσταση στο διαχωρισμό, καθώς και τη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ [45,46,49-55].

Στον **Πίνακα 2-1**, που παρουσιάζεται ακολούθως, συνοψίζονται οι μέθοδοι σχεδιασμού μιγμάτων ΑΣΣ συνοδευόμενα και από ένα δείγμα αντίστοιχων μελετών που τις εφαρμόζουν και μελετούν [6,7,13,41-43,45-80].

Πίνακας 2-1. Μέθοδοι σχεδιασμού μίγματος ΑΣΣ.

Μέθοδος	Αναφορά
Εμπειρικού Σχεδιασμού	[6,7,41-43,56-58]
Μέθοδοι Βασισμένες στη Βέλτιστη Πυκνότητα Στοίβαξης	[13,59-65]
Μέθοδοι Βασισμένες στη Θλιπτική Αντοχή	[47,65-70]
Μέθοδοι Βασισμένες σε Μοντέλο Ρεολογίας της Πάστας	[48,71-80]
Μέθοδοι Βασισμένες σε Στατιστικό Παραγοντικό Μοντέλο	[45,46,49-55]

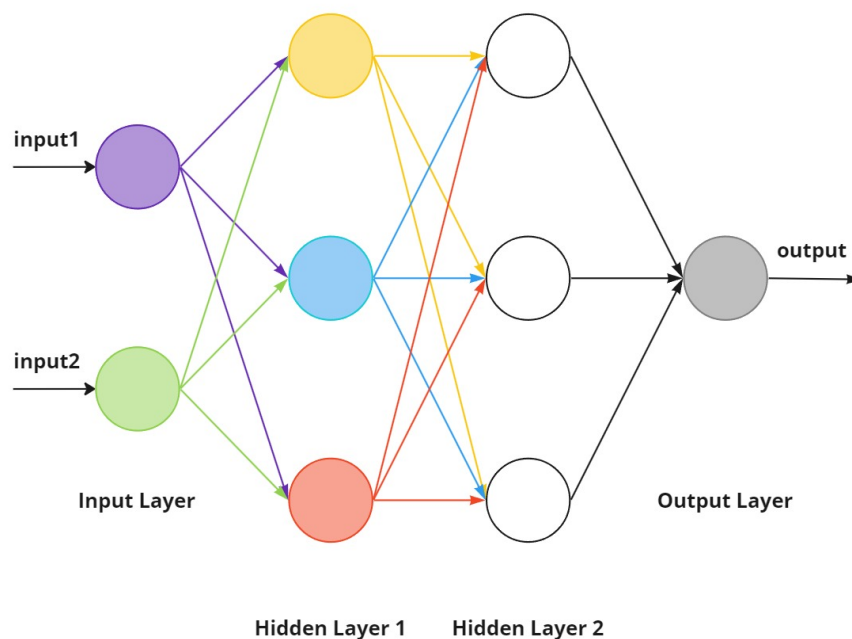
2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τα ΤΝΔ διακρίνονται σε διάφορες μορφές και υποστηρίζουν την υλοποίηση πολλών αλγορίθμων βαθιάς μάθησης. Το πρόβλημα μελέτης είναι αυτό που καθορίζει τις διακυμάνσεις και την τοπολογία του δικτύου. Οι ακόλουθες ενότητες επεξηγούν τους θεμελιώδεις τύπους νευρωνικών δικτύων.

2.2.1 Νευρωνικά Δίκτυα Πρόσθιας Τροφοδότησης (Feed forward network)

Ένα νευρωνικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από το σύνολο των νευρώνων που το απαρτίζουν καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτοί οργανώνονται και δημιουργούν συνάψεις μεταξύ τους. Στην πιο συνηθισμένη μορφή νευρωνικών δικτύων οι νευρώνες οργανώνονται σε διαδοχικά επίπεδα (layers) συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά. Το πρώτο επίπεδο ονομάζεται επίπεδο εισόδου (input layer) και αποτελεί την δίοδο εισαγωγής των εξωτερικών δεδομένων στο μοντέλο. Στη συνέχεια ακολουθούν ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα (hidden layers) νευρώνων, ο αριθμός ποικίλει ανάλογα με την αρχιτεκτονική του μοντέλου. Το τελευταίο επίπεδο του μοντέλου ονομάζεται επίπεδο εξόδου (output layer) και αποτελεί το μέσο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων ενός δικτύου επιτυγχάνονται με τις μεταξύ τους συνάψεις. Ο νευρώνας i του επιπέδου K δέχεται εισόδους από τους νευρώνες του επιπέδου $K-1$ με τους οποίους συνδέεται με βάρη w_i , υπολογίζει την έξοδο του όπως περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 1.3, και τη μεταφέρει σαν είσοδο στο επίπεδο $K+1$. Η μορφή των συνάψεων μεταξύ δύο επιπέδων μπορεί να διαφέρει, συνηθέστερη μορφή σύναψης αποτελεί ο ένας νευρώνας του επιπέδου K να συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επιπέδου $K+1$ δημιουργώντας ένα πλήρες συνδεδεμένο (fully connected) πλέγμα. Στην **Εικόνα 2-8** απεικονίζεται ένα παράδειγμα νευρωνικού δικτύου τέτοιας αρχιτεκτονικής. Εναλλακτικά θα μπορούσε πολλοί νευρώνες ενός επιπέδου να συνδέονται με έναν μοναδικό νευρώνα του επομένου επιπέδου ή οι έξοδοι από συγκεκριμένους νευρώνες να προωθούνται άμεσα σε επόμενο επίπεδο του δικτύου.



Εικόνα 2-8. Παράδειγμα ΤΝΔ πρόσθιας τροφοδότησης με δύο κρυφά επίπεδα νευρώνων.

Τα δίκτυα της παραπάνω μορφής ονομάζονται νευρωνικά δίκτυα πρόσθια διάδοσης (feed forward neural networks) καθώς η ροή της πληροφορίας από το επίπεδο εισόδου ως το επίπεδο εξόδου ακολουθεί μια μοναδική κατεύθυνση. Στην παραπάνω αρχιτεκτονική βασίστηκαν τα μοντέλα της συγκεκριμένης μελέτης.

2.2.2 Επαναληπτικά Νευρωνικά Δίκτυα (RNN)

Τα επαναληπτικά νευρωνικά δίκτυα (recurrent neural networks – RNN) αποτελούν έναν ειδικό τύπο τεχνητού νευρωνικού δικτύου ειδικά προσαρμοσμένου για την χρήση σε σύνολα διαδοχικών δεδομένων. Τα RNN μπορούν να περιγραφούν σαν νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης στα οποία εισάγεται η δυνατότητα σύνδεσης των νευρώνων ενός επιπέδου με άλλους νευρώνες, στο ίδιο ή σε προηγούμενα επίπεδα, με σκοπό τη δημιουργία κλειστών κύκλων και επαναλήψεων. Η προσθήκη αυτή προσφέρει στο μοντέλο την ικανότητα αποθήκευσης πληροφοριών και αποτελεσμάτων προηγούμενων εισόδων με σκοπό τη χρήση τους στην τρέχουσα επανάληψη για την εξαγωγή αποτελέσματος. Η παραπάνω ιδιότητα προσομοιάζει την ικανότητα της «μνήμης» που είναι απαραίτητη για την επεξεργασία δεδομένων στα οποία εισάγεται ο παράγοντας του χρόνου. Ως διαδοχικά δεδομένα ορίζουμε

ταξινομημένα δεδομένα στα οποία τα γεγονότα διαδέχονται το ένα το άλλο, συνηθέστερο παράδειγμα αποτελούν τα οικονομικά δεδομένα.

Παρά το γεγονός ότι τα RNN χρησιμοποιούνται σαν κύριος εκφραστής αρκετών αλγορίθμων μηχανικής μάθησης γνωρίζουν ορισμένους σημαντικούς περιορισμούς. Κλασικά μοντέλα RNN αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην αποτύπωση μακροπρόθεσμων σχέσεων καθώς το διάστημα μεταξύ σχετικών πληροφοριών, σε σχέση με το διάστημα της κάθε επανάληψης, είναι μεγάλο. Σαν αποτέλεσμα τα σήματα λάθους που ανατροφοδοτούνται στο μοντέλο τείνουν να χάνονται. Τα δίκτυα μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (LSTM), αποτελούν τύπο RNN, που δημιουργήθηκαν με σκοπό να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν.

2.2.3 Δίκτυα Μακράς Βραχυπρόθεσμης Μνήμης (LSTM)

Η πρόκληση η οποία οδήγησε στην εμφάνιση των LSTM είναι η διατήρηση μακροχρόνιων εξαρτήσεων μεταξύ των μεταβλητών του μοντέλου και η αντιμετώπιση του προβλήματος της παράκαμψης των σημάτων που επανατροφοδοτούνται στο μοντέλο μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα, μια από τις πρώτες προσπάθειες για την αντιμετώπιση των παραπάνω ήταν η βραχυπρόθεσμη μνήμη (Hocheiter Schmidhuber, 1997). Η αρχιτεκτονική των LSTM τους προσδίδει τη δυνατότητα να αποθηκεύουν πληροφορίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στα LSTM εισάγεται ένα νέο είδος κελιού που ονομάζεται κελί μνήμης (memory cell), αρμοδιότητα του οποίου αποτελεί η καταγραφή πρόσθετων πληροφοριών. Η καταγραφή και διαχείριση των δεδομένων στο κελί μνήμης εποπτεύεται από συναρτήσεις τις οποίες ονομάζουμε πύλες. Η πύλη εισόδου (input gate) προστατεύει το περιεχόμενο του κελιού μνήμης φιλτράροντας τις τιμές τις οποίες θα πρέπει να αντικατασταθούν με βάση την τρέχουσα είσοδο. Παρομοίως η πύλη εξόδου (output gate) προφυλάσσει τα υπερκείμενα κελιά μνήμης από το να λάβουν μη σημαντικές πληροφορίες που είχαν αποθηκευτεί στο κελί μνήμης. Τέλος η πύλη λήθης (forget gate) είναι αυτή που καθορίζει ποιες πληροφορίες θα πρέπει να παραληφθούν στη συγκεκριμένη χρονική σήμανση.

2.2.4 Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (CNN)

Τα συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν ειδική κατηγορία πρόσθιου νευρωνικού δικτύου. Έχουν σχεδιαστεί για την καλύτερη επεξεργασία δεδομένων σε μορφή πίνακα,

παραδείγματα τέτοιων δεδομένων αποτελούν οι εικόνες και τα βίντεο. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ύπαρξη συνδέσεων μεταξύ γειτονικών νευρώνων, στον διαμοιρασμό βαρών, στην χωρική υποδειγματοληψία (pooling) και στη χρήση πολλαπλών επιπέδων.

Η αρχιτεκτονική ενός συνελκτικού δικτύου αποτελείται από πολλαπλά στάδια που με τη σειρά τους αποτελούνται από επιμέρους επίπεδα. Τα πρώτα στάδια αποτελούνται από δύο είδη επιπέδων, τα συνελκτικά επίπεδα και τα επίπεδα pooling. Οι νευρώνες των συνελκτικών επιπέδων είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία ενός χάρτη χαρακτηριστικών (feature map). Πιο συγκεκριμένα ο κάθε νευρώνας υπολογίζει τη συνέλιξη ενός τμήματος από τους χάρτες χαρακτηριστικών που έλαβε σαν είσοδο από το προηγούμενο επίπεδο. Το αποτέλεσμα της συνέλιξης επεξεργάζεται από μια μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης πριν προστεθεί στο χάρτη χαρακτηριστικών. Η αρχιτεκτονική αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι σε πίνακες δεδομένων, όπως οι εικόνες, οι γειτονικές τιμές (pixels) συσχετίζονται μεταξύ τους με μοτίβα που μπορούν να γίνουν εύκολα αντιληπτά από το μοντέλο. Στη συνέχεια ακολουθεί το επίπεδο pooling.

Το επίπεδο pooling είναι υπεύθυνο για τη διαλογή των χαρακτηριστικών που παρήχθησαν από το επίπεδο συνέλιξης. Οι νευρώνες για να καταλήξουν στη επιλογή των δεδομένων υπολογίζουν το μέγιστο ή τον μέσο του χάρτη χαρακτηριστικών διατηρώντας τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά και συμπύσσοντας εκείνα που είναι παρόμοια σημασιολογικά.

2.2.5 Αλγόριθμος Οπισθοδιάδοσης Σφάλματος (Back propagation)

Ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης σφάλματος συναντάται συχνότερα από κάθε άλλο αλγόριθμο στην εκπαίδευση ΤΝΔ. Πρωτοεμφανίστηκε το 1970 με διαφορετική μορφή από τη σημερινή (Linn70), ενώ η εξέλιξη του (Werb74, Rume86) τον καθιέρωσαν ως τον βασικότερο αλγόριθμο εκπαίδευσης δικτύων πρόσθιας διάδοσης. Επιπλέον γενικεύσεις του αλγορίθμου όπως ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης σφάλματος στο χρόνο (back propagation through time - BPTT) χρησιμοποιούνται ευρέως σε ΤΝΔ που ο απλός αλγόριθμος δεν βρίσκει εφαρμογή.

Η λειτουργία του βασίζεται στην εφαρμογή του κανόνα της αλυσίδας για την προσαρμογή των βαρών (weights) σε κάθε επίπεδο του δικτύου για κάθε εποχή εκπαίδευσης, για την επίτευξη του οποίου γίνεται χρήση του σφάλματος που έχει προκύψει από προηγούμενες εποχές εκπαίδευσης. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία

εκπαίδευσης ενός ΤΝΔ. Αρχικά κατά την πρόσθια τροφοδότηση δίνοντας δεδομένα εισόδου σε ένα ΤΝΔ οι πληροφορίες διαχέουν όλους τα επίπεδα και τους νευρώνες του και τελικά επιστρέφεται μια έξοδος. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης η διάδοση συνεχίζεται μέχρι τον υπολογισμό του σφάλματος της συνάρτησης κόστους. Εν συνεχεία ο αλγόριθμος οπίσθιας διάδοσης επιτρέπει στην πληροφορία του σφάλματος να μεταδοθεί με αντίθετη κατεύθυνση προς στα επίπεδα του δικτύου. Η πληροφορία χρησιμοποιείται από μοντέλο για την μεταβολή των εσωτερικών παραμέτρων του μοντέλου (weight, bias) του κάθε νευρώνα) με τη χρήση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ

Η τεχνολογία σκυροδέματος και κονιάματος διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη βιομηχανία των κατασκευών και η ακριβής πρόβλεψη των ιδιοτήτων τους είναι ουσιαστική για τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και της ανθεκτικότητας των κτιρίων. Τα ΤΝΔ έχουν εμφανιστεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της τεχνολογίας σκυροδέματος και κονιαμάτων. Αποτυπώνουν αποτελεσματικά περίπλοκες σχέσεις μεταξύ εισαγόμενων μεταβλητών και εξαγόμενων ιδιοτήτων, και για τον λόγο αυτό καθίστανται κατάλληλα για την πρόβλεψη. Η παρούσα ενότητα στοχεύει στην εξερεύνηση της εφαρμογής των μοντέλων πρόβλεψης ΤΝΔ στην τεχνολογία σκυροδέματος και κονιαμάτων, επισημαίνοντας την αποτελεσματικότητα και τα πιθανά οφέλη τους.

Η εφαρμογή μοντέλων πρόβλεψης ΤΝΔ στην τεχνολογία σκυροδέματος και κονιαμάτων έχει επιδειχθεί σε διάφορες μελέτες. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε (**Πίνακας 2.2**) κατέστη φανερή η σύνδεση της εφαρμογής των ΤΝΔ με μοντέλα πρόβλεψης της αντοχής του σκυροδέματος, εκτιμώντας μεταξύ άλλων τη θλιπτική αντοχή[81-91], την αντοχή σε κάμψη[85,92] και εφελκυσμό[85,92,93] κ.α. Αυτά τα μοντέλα αξιοποιούν δεδομένα διαφόρων εισαγόμενων παραμέτρων, όπως τα συστατικά του σκυροδέματος, μετρήσεις από μη καταστροφικές δοκιμές και τεχνικές εξόρυξης για να εκτιμήσουν την αντοχή του.

Επιπλέον, η χρήση των ΤΝΔ επεκτείνεται και στα αυτοσυμπυκνούμενα μίγματα, με τις

μελέτες που έχουν ήδη διεξαχθεί να περιλαμβάνουν την κατασκευή μοντέλων πρόβλεψης για το σχεδιασμό κατάλληλων αυτοσυμπυκνούμενων μιγμάτων[94], καθώς και την εκτίμηση ρεολογικών[95,96] και μηχανικών ιδιοτήτων[96-102] των αυτοσυμπυκνούμενων μιγμάτων.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή μοντέλων πρόβλεψης ΤΝΔ στην τεχνολογία σκυροδέματος και κονιαμάτων είναι αρκετά ενθαρρυντική. Η χρήση των ΤΝΔ, σε συνδυασμό με γενετικούς αλγόριθμους και εξελικτικές διαδικασίες αναζήτησης, έχει συμβάλλει στην περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων. Τα μοντέλα πρόβλεψης μπορούν να παρέχουν ακριβείς και αξιόπιστες πληροφορίες συμβάλλοντας στη βελτίωση της παραγωγής, της επίδοσης και της ποιότητας των μιγμάτων σκυροδέματος και κονιάματος στον κατασκευαστικό τομέα εξοικονομώντας χρόνο αλλά και πόρους.

Πίνακας 2-2. Εφαρμογές ΤΝΔ στην επιστήμη του σκυροδέματος.

Στόχος Χρήσης ΤΝΔ	Αναφορά
Μη αυτοσυμπυκνούμενα μίγματα σκυροδέματος	
Πρόβλεψη θλιπτικής αντοχής	[81-91]
Πρόβλεψη αντοχής σε κάμψη	[85,92]
Πρόβλεψη αντοχής σε εφελκυσμό	[85,92,93]
Πρόβλεψη κατάπτωσης	[86]
Πρόβλεψη του πλάτους ρωγμών συρρίκνωσης	[103]
Αυτοσυμπυκνούμενα μίγματα σκυροδέματος	
Σχεδιασμός μιγμάτων ΑΣΣ	[94]
Πρόβλεψη φρέσκων ιδιοτήτων ΑΣΣ	[95]
Εκτίμηση ροής καθίζησης και θλιπτικής αντοχής ΑΣΣ	[96]
Πρόβλεψη θλιπτικής αντοχής ΑΣΣ	[97-101]
Πρόβλεψη μηχανικών ιδιοτήτων ΑΣΣ	[102]

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ & ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε μια πληθώρα μεταβλητών που περιγράφουν της φυσικές ιδιότητες και τις αναλογίες των συστατικών που θα μπορούσαν δυνητικά να επηρεάσουν τη ρεολογική συμπεριφορά ενός αυτοσυμπυκνούμενου μίγματος. Για καθένα από τα συστατικά νερού, τσιμέντου, πληρωτικού υλικού και λεπτόκοκκων αδρανών, η ποσότητα που περιείχε το μίγμα αντιμετωπίστηκε ως μεταβλητή εκφρασμένη σε μάζα ανά μονάδα όγκου. Στην περίπτωση των κοκκώδων συστατικών, εισήχθησαν μεταβλητές που σχετίζονται με το ειδικό βάρος και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Επιπλέον, για το πληρωτικό υλικού εισήχθη μια μεταβλητή που αφορούσε το σχήμα των σωματιδίων ως προς την ειδική επιφάνεια (Special Surface Area – SSA) και τη σφαιρικότητα. Ο εν λόγω δείκτης υπολογίστηκε κάνοντας χρήση του λογισμικού ανάλυσης εικόνας ImageJ (NIH, Μέριλαντ, ΗΠΑ) από τιμές μέτρησης που σχετίζονται με την προβαλλόμενη περιοχή των σωματιδίων και το εμβαδό του ελάχιστου περιγραφόμενου κύκλου ενός σωματιδίου[104,105]. Στον Πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι μονάδες μέτρησης της κάθε μίας.

Πίνακας 3-1. Πίνακας μεταβλητών εισόδου.

Παράμετρος	Μονάδες μέτρησης
Περιεκτικότητα σε νερό	kg/m ³
Περιεκτικότητα σε τσιμέντο	kg/m ³
Ειδική επιφάνεια πληρωτικού υλικού	cm ² /g
Περιεκτικότητα σε πληρωτικό υλικό	kg/m ³
Κατανομή μεγέθους σωματιδίων πληρωτικού υλικού	μm
Ειδικό βάρος πληρωτικού υλικού	g/cm ³
Δείκτης σφαιρικότητας πληρωτικού υλικού	-
Περιεκτικότητα σε λεπτό αδρανές	kg/m ³
Κατανομή μεγέθους σωματιδίων λεπτού αδρανούς	μm
Ειδικό βάρος λεπτού αδρανούς	g/cm ³
Χαρακτηρισμός σύνθεσης	-

3.1.1 Βιβλιογραφικά Δεδομένα

Για τη μελέτη έγινε χρήση ενός συνόλου δεδομένων εισόδου και εξόδου το οποίο συλλέχθηκε έπειτα από βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η συλλογή επικεντρώθηκε σε δημοσιεύσεις που παρουσιάζουν συνθέσεις κονιάματος αποτελούμενο από ένα ή κανένα τύπο πληρωτικού υλικού εξαιρώντας διμερή και τριμερή μίγματα πληρωτικών[106-130] Guanetal. 2020. Για την επίτευξη μιας τελικής αξιολόγησης μιγμάτων με ομοιομορφία και ακρίβεια συμπεριλήφθηκαν μόνο οι συνθέσεις των οποίων η ρεολογία είχε ελεγχθεί σύμφωνα με τις μεθόδους που προτείνονται από τις κατευθυντήριες γραμμές της EFNARC (μικρή δοκιμή εξάπλωσης και μικρή δοκιμή χοάνης V), προκειμένου να συνάδουν με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας[8]. Στην περίπτωση συνθέσεων που δεν περιείχαν πληρωτικό υλικό, σε όλες τις σχετικές παραμέτρους εκχωρήθηκε η τιμή «0».

3.1.2 Πειραματικά Δεδομένα

Επιπλέον, για την ενίσχυση της ακρίβειας του μοντέλου ΤΝΔ λήφθηκαν υπόψη πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Πιο συγκεκριμένα, με κριτήριο τη ρεολογία, συλλέχθηκαν δεδομένα από 9 αποδεκτά και 69 απορριφθέντα μίγματα. Η εν λόγω ετερογένεια εκτιμάται ότι πηγάζει από την πληθώρα θετικά αξιολογημένων συνθέσεων που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία.

Για την παραγωγή όλων των δυνητικά αυτοσυμπυκνούμενων μιγμάτων έγινε χρήση τυπικών τσιμέντων Portland (CEMI42.5R) που συμμορφώνονται στο πρότυπο EN 197-1:2011 και ασβεστολιθικής άμμου 0/4 mm με ειδικό βάρος και μέτρο λεπτότητας 2,67 και 2,73, αντίστοιχα. Προηγουμένως, σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν προκαταρκτικά αποδεκτές συνθέσεις σταθερής αναλογίας νερού/τσιμέντου και πληρωτικού/τσιμέντου για 8 διαφορετικά πληρωτικά υλικά, δύο διαφορετικές ποιότητες μαρμάρου, περλίτης και ελαφρόπετρα, σε μορφή σκόνης προερχόμενη από το κοσκίνισμα πιο χονδρού κλάσματος, μικροπυρίτιο (microsilica) και διογκωμένος περλίτης προερχόμενα από την άλεση και διόγκωση περλίτη, αντίστοιχα, καθώς και σκόνη τσιμεντοκαμίνου (cement kiln dust – CKD) και αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (by pass dust – BPD), παραπροϊόντα προερχόμενα από τη διεργασία παραγωγής τσιμέντου.

Έπειτα ακολούθησε η σύνθεση των δειγμάτων, κατά την οποία, η παραμετρική

τροποποίηση συγκεκριμένων βημάτων της συνέβαλλε στην παραγωγή μεγάλης πληθώρας δεδομένων εισόδου οι οποίες σχετίζονται με διαφορετικές περιεκτικότητες νερού, τσιμέντου, ασβεστολιθικής άμμου και πληρωτικού υλικού. Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση ξεκινούσε με την αρχική ανάμιξη κατάλληλων ποσοτήτων των ξηρών υλικών για 60s. Ακολουθούσε η προσθήκη κατάλληλης ποσότητας νερού με παράλληλη ανάδευση για 120s. Έπειτα, η αρχική καθώς και κάθε πρόσθετη δόση χημικών προσμίκτων λάμβανε χώρα με ταυτόχρονη ανάδευση για 60s. Όλα τα δείγματα που συντέθηκαν τέθηκαν, εν συνεχεία, σε μικρή δοκιμή ανεμπόδιστης εξάπλωσης (mini slump flow test) και μικρή δοκιμή χοάνης V (mini V Funnel Test), οι οποίες διεξήχθησαν σύμφωνα με τις οδηγίες EFNARC[8], και τα αποτελέσματα αξιοποιήθηκαν για την αξιολόγησή τους.

3.1.3 Διαδικασία Αξιολόγησης & Κατάταξης Δεδομένων

Όλοι οι συνδυασμοί συνθέσεων, τόσο αυτοί που συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία όσο και αυτοί που εξετάστηκαν πειραματικά, αξιολογήθηκαν ως προς την καταλληλότητά τους να αποτελέσουν ΑΣΚ. Σύμφωνα με τα κριτήρια της συσχέτισης της μικρής δοκιμή εξάπλωσης και μικρής δοκιμή χοάνης V, σε κάθε συνδυασμό εκχωρήθηκε η τιμή «1» ή «0» αντικατοπτρίζοντας τη θεώρηση επαρκούς ή μη επαρκούς σύνθεσης, αντίστοιχα, ανάγοντας το εν λόγω πρόβλημα σε ένα πρόβλημα δυαδικής ταξινόμησης. Τα αποδεκτά όρια, όπως ορίζονται από το EFNARC, θεωρήθηκαν τα εύρη 240-260mm και 7-11s για τη δοκιμή εξάπλωσης και δοκιμή χοάνης V, αντίστοιχα.

Ωστόσο, για μια πιο ακριβή εκτίμηση, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν το ιξώδες και το όριο διαρροής, όπως υποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα δοκιμών φρέσκου σκυροδέματος/κονιάματος. Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν τα δύο πιο σημαντικά χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται ευρέως σε συνθέσεις ΑΣΣ και ΑΣΚ, οι υπερρευστοποιητές (superplasticizers – SP) και οι παράγοντες τροποποίησης του ιξώδους (viscosity modifying agents – VMA). Παρότι η τεχνολογία των δύο αυτών χημικών πρόσμικτων είναι πολυπαραγοντική και εξελίσσεται διαρκώς, προτιμήθηκε να μη ληφθεί υπόψη ο τύπος, οι μηχανισμοί, οι ιδιότητες ή η αναλογία κάθε πρόσμιξης. Έγινε, ωστόσο, μια πιο γενικευμένη αλλά πειραματικά επιβεβαιωμένη υπόθεση ότι η προσθήκη ενός SP ή VMA επιδρά σημαντικά στο ιξώδες και το όριο διαρροής, γεγονός που υποδεικνύεται από τις σημαντικές αλλαγές στην εξάπλωση του μίγματος και το χρόνο εκκένωσης της χοάνης V. Ως εκ τούτου, στις

συνθέσεις που φαινομενικά ήταν μη αποδεκτές, κατά το EFNARC, αλλά με την προσθήκη κατάλληλου χημικού πρόσμικτου μπορούσαν ενδεχομένως να λάβουν τιμές εντός ορίων αποδόθηκε η τιμή «1».

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΝΔ

Για τη βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής του μοντέλου πρόβλεψης της αυτοσυμπυκνωσιμότητας μιγμάτων κονιάματος δημιουργήθηκαν αυτόματα, εκπαιδεύτηκαν, δοκιμάστηκαν, και αξιολογήθηκαν ως προς την ακρίβειά τους πολλές δοκιμές μοντελοποίησης. Στις παρακάτω ενότητες περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν.

Η κανονικοποίηση των δεδομένων με σκοπό την ένταξη τους σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών αποτελεί πρωταρχικό βήμα της διαδικασίας εκπαίδευσης ενός ΤΝΔ. Η κανονικοποίηση ορίζεται ως η διαδικασία προσαρμογής των τιμών εισόδου σε ένα συγκεκριμένο διάστημα, το διάστημα αυτό τυπικά είναι το [0-1]. Η πλειοψηφία των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης απαιτούν την εισόδου κανονικοποιημένων δεδομένων σαν ερέθισμα του αλγορίθμου. Η χρήση κανονικοποιημένων δεδομένων επιταχύνει την ταχύτητα εκπαίδευσης του αλγορίθμου και βοηθάει στην αποφυγή προβλημάτων όπως η δημιουργία ανεξέλεγκτων τιμών λάθους κατά τη διαδικασία οπίσθιας διάδοσης (exploding gradient problem). Αντίθετα η χρήση δεδομένων με μεγάλες διακυμάνσεις τιμών δυσχεραίνουν τη μάθηση του αλγορίθμου και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αποτρέψουν ολοκληρωτικά τη μάθηση στο δίκτυο. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης η κανονικοποίηση των δεδομένων επιτεύχθηκε με χρήση του Keras normalizer (https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/utils/normalize) που περιέχεται στη βιβλιοθήκη βαθειάς μάθησης της γλώσσας προγραμματισμού Python Tensorflow (<https://www.tensorflow.org/>).

Επόμενο βήμα αποτέλεσε ο διαχωρισμός των δεδομένων δε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αποτελεί τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του αλγορίθμου (training data) ενώ η δεύτερη, τα δεδομένα με τα οποία αξιολογήθηκαν οι επιδόσεις του αλγορίθμου (test data) και ήταν άγνωστα στον αλγόριθμο κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσής του. Από το σύνολο των 228 πειραματικών συνθέσεων οι 34 χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων (test data) του δικτύου ενώ οι υπόλοιπες 194 για την εκπαίδευση του (training

data). Συγκεκριμένα για την επιλογή των test data επιλέχθηκαν μόνο συνθέσεις οι οποίες υλοποιήθηκαν στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ για την εξασφάλιση της ορθής τήρησης της διαδικασίας και τη διασφάλιση του αποτελέσματος.

Ακολούθησε η επιλογή των υπερπαραμέτρων του μοντέλου. Ορισμένες παράμετροι αρχιτεκτονικής παρέμειναν σταθερές κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Ο αριθμός των νευρώνων του επιπέδου εισόδου (input layer) παρέμεινε σταθερός και ίσος με 18 καθώς ορίζεται από τον αριθμό των πειραματικών μεταβλητών. Καθώς το αντικείμενο μελέτης αποτελεί ένα πρόβλημα ταξινόμησης (classification problem) το πλήθος των νευρώνων του επιπέδου εξόδου (output layer) καθορίζεται σε 1 και σαν συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα επιλέγεται η σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoid). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων, όπως ο αριθμός των κρυφών επιπέδων, ο αριθμός των νευρώνων ανά επίπεδο, η χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ενεργοποίησης και βελτιστοποίησης, το μέγεθος των δεδομένων επικύρωσης (αναλογία συνολικού αριθμού των σειρών δεδομένων εισόδου προς εκπαίδευση και επικύρωση), και ο ρυθμός εκμάθησης κυμάνθηκαν εντός συγκεκριμένων ορίων, όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3-2**.

Πίνακας 3-2. Εξεταζόμενες τιμές των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων.

Παράμετρος	Εξεταζόμενες τιμές
Ρυθμός Εκμάθησης	0.002; 0.003; 0.004; 0.005
ValidationSize	10%; 11%; 12%; 13%; 14%; 15%; 16%; 17%; 18%; 19%; 20%
Συνάρτηση Ενεργοποίησης	Relu; Sigmoid; Softmax; Softsign; Tanh; Selu; Elu; Exponential
Συνάρτηση Βελτιστοποίησης	Adam; Adamax; Nadam; RMSprop; SGD; Adadelta; Adagrad
Αριθμός Κρυφών Επιπέδων	1; 2; 3
Νευρώνες του 1^{ου} Κρυφού Στρώματος	18; 36; 78
Νευρώνες του 2^{ου} Κρυφού Στρώματος	½x (Νευρώνες του προηγούμενου στρώματος) – αν εφαρμόζεται
Νευρώνες του 3^{ου} Κρυφού Στρώματος	½ x (Νευρώνες του προηγούμενου στρώματος) – αν εφαρμόζεται

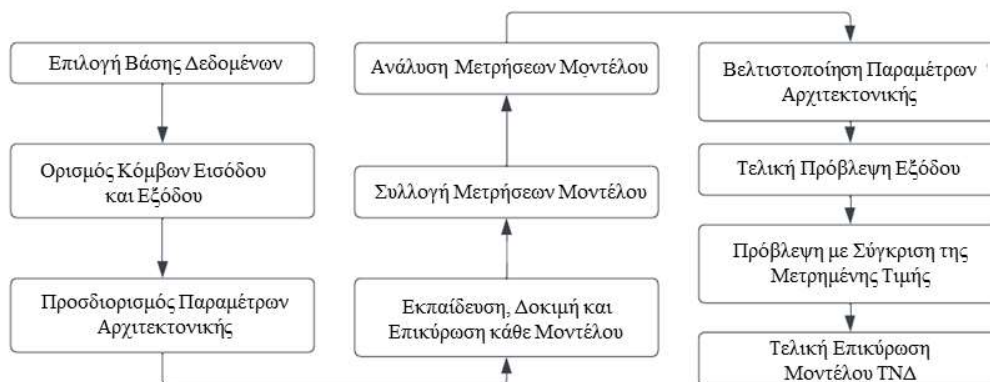
Η εκτέλεση όλων των εξεταζόμενων συνδυασμών, τα οποία ανήλθαν σε περίπου 22.100 μοντέλα, αποτέλεσε μια χρονοβόρα διαδικασία που ολοκληρώθηκε επιτυχώς κάνοντας χρήση κατάλληλου αλγορίθμου αυτόματης εκτέλεσης και συλλογής των δεδομένων για την αξιολόγηση των μοντέλων. Κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης του αλγορίθμου υπήρχε ένα στοιχείο τυχαιότητας, δεδομένου ότι τα δεδομένα για την εκπαίδευση είναι πάντα διαφορετικά έπειτα από

την τυχαία επιλογή. Για την αντιμετώπιση του εν λόγω ζητήματος, κάθε μοντέλο που παράχθηκε εκπαιδεύτηκε τουλάχιστον 3 φορές και θεωρήθηκε τελικά αποδεκτό μόνο στην περίπτωση επίτευξης ακρίβειας μεγαλύτερης του 80% σε όλες τις δοκιμές.

Η επιλογή του μοντέλου με τη βέλτιστη αρχιτεκτονική και απόδοση βασίστηκε στη συλλογή, επεξεργασία, και αξιολόγηση των μέσων τιμών ακριβείας των αποδεκτών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, η αξιολόγηση της απόδοσης κάθε νευρωνικού δικτύου αφορούσε στον έλεγχο των τιμών της απώλειας και της δυαδικής ακρίβειας, με την αξιολόγηση της τελικής απόδοσης κάθε μοντέλου να προκύπτει από την ακρίβεια δοκιμής της πρόβλεψης του αλγορίθμου, δηλαδή από τη σχέση:

$$1 - \frac{\text{λάθος προβλέψεις}}{\text{συνολικές προβλέψεις}}$$

Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής της **Εικόνας 3-1**, το οποίο βασίζεται στο έργο της Laurene Fausset, η οποία καθιέρωσε τις θεμελιώδεις αρχές για την αρχιτεκτονική, τους αλγόριθμους και τις εφαρμογές των ΤΝΔ.



Εικόνα 3-1. Διαδικασία βελτιστοποίησης ενός μοντέλου ΤΝΔ.

3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Έπειτα από την αξιολόγηση των 22.100 μοντέλων, ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν 6 μοντέλα με την καλύτερη δυνατή απόδοση τα οποία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3-3**. Τα μοντέλα επιλέχθηκαν ούτως ώστε να παρέχουν μέγιστη ακρίβεια μεγαλύτερη από 90%, ελάχιστη ακρίβεια μεγαλύτερη από 45% και μέση ακρίβεια μεγαλύτερη από 80% ταυτόχρονα. Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3-3**, και τα 6 μοντέλα επιτυγχάνουν παρόμοια ακρίβεια μεταξύ των προβλεπόμενων εξόδων και των πειραματικών

αποτελεσμάτων (~85%). Παρότι η εν λόγω ακρίβεια αποτελεί πιθανώς το πιο σημαντικό κριτήριο επιλογής, δεν χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για την τελική επιλογή του βέλτιστου μοντέλου, αλλά λήφθηκαν υπόψη και τα αποτελέσματα της διαδικασίας εκπαίδευσης του αλγορίθμου.

Πίνακας 3-3.Υπερπαράμετροι και αποτελέσματα ακρίβειας για καθένα από τα δοκιμαστικά μοντέλα ANN που προτείνονται.

Μοντέλο TNA	Κρυφά Επίπεδα	Νευρώνες ανά Κρυφό Επίπεδο	Συνάρτηση Ενεργοποίησης	Συνάρτηση Βελτιστοποίησης	Ρυθμός Εκμάθησης	Μέγεθος Δεδομένων Επικύρωσης	Μέγιστη Ακρίβεια	Ελάχιστη Ακρίβεια	Μέγιστη Απόλεια	Ελάχιστη Απόλεια	Ακρίβεια Δεδομένων Ελέγχου
M1	3	36/18/9	Softsign	Nadam	0,040	0,18	0,90	0,51	0,69	0,34	0,84
M2	3	72/36/18	Softsign	Adamax	0,005	0,14	0,92	0,51	0,70	0,38	0,85
M3	3	72/36/18	Relu	Adamax	0,004	0,12	0,93	0,47	0,69	0,31	0,85
M4	2	72/36	Relu	Adamax	0,005	0,14	0,92	0,46	0,69	0,41	0,86
M5	1	36	Relu	Nadam	0,004	0,12	0,90	0,58	0,68	0,38	0,86
M6	2	18/9	Softsign	Adam	0,003	0,10	0,92	0,52	0,69	0,39	0,86

Για την περαιτέρω αξιολόγηση των παραπάνω μοντέλων παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση του εμπειρικού σφάλματος και ακρίβειας της ταξινόμησης συναρτήσει των εποχών του αλγορίθμου TNA. Τα εν λόγω γραφήματα, πέρα από τους δείκτες ακριβείας, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία εκπαίδευσης κάθε μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων εμμέσων πληροφοριών αναφορικά με την εμφάνιση φαινομένων υπερπροσαρμογής (overfitting) ή υποπροσαρμογής (underfitting).

Κριτήριο αξιολόγησης αποτελεί η διακύμανση των δύο αυτών καμπυλών, η οποία απαιτείται να είναι ομαλή στο τέλος των εποχών και χωρίς έντονες αποκλίσεις κατά τις διαδοχικές επαναλήψεις του αλγορίθμου. Επιπλέον, η καμπύλη των δεδομένων επικύρωσης του διαγράμματος ακρίβειας-εποχών πρέπει να βρίσκεται πάνω από την καμπύλη των δεδομένων εκπαίδευσης, λαμβάνοντας μια υψηλή τιμή κατά το τέλος των εποχών του αλγορίθμου. Ακόμη, η καμπύλη των δεδομένων επικύρωσης του διαγράμματος απώλειας-εποχών πρέπει να βρίσκεται πάντα πιο χαμηλά από την καμπύλη των δεδομένων εκπαίδευσης διαμορφώνοντας, μάλιστα, μια πτωτική τάση κατά το τέλος των εποχών του αλγορίθμου.

Αναφορικά με το μοντέλο M1 (**Γράφημα 3-1.α, Γράφημα 3-2. α**), αυτό χαρακτηρίζεται από σημαντικά μεγάλη διακύμανση του εμπειρικού σφάλματος τόσο για τα δεδομένα εκπαίδευσης όσο και για τα δεδομένα επικύρωσης του αλγορίθμου. Επιπρόσθετα, η αρκετά αυξημένη τιμή του ρυθμού εκμάθησης δε διευκολύνει τη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη δυνατή ομάδα παραμέτρων.

Το μοντέλο M2 (**Γράφημα 3-1.β, Γράφημα 3-2.β**), από την άλλη, σχεδιάστηκε με 8 φορές μικρότερο ρυθμό εκμάθησης, και διπλάσιους, σε αριθμό, νευρώνες στο κρυφό επίπεδο, σε σύγκριση με το M1. Σε αυτή την περίπτωση, παρότι παρατηρήθηκε πιο ομαλή διακύμανση του εμπειρικού σφάλματος των δεδομένων εκπαίδευσης, η καμπύλη τους προέκυψε αρκετά απομακρυσμένη από την καμπύλη των δεδομένων επικύρωσης.

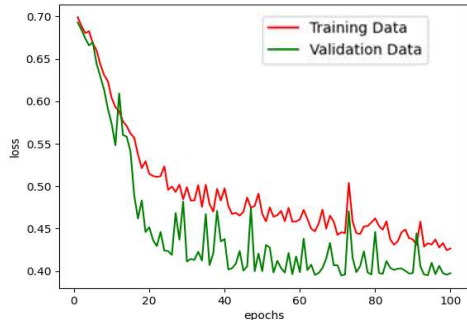
Το μοντέλο M3 (**Γράφημα 3-1.γ, Γράφημα 3-2.γ**), με χαρακτηριστικά παρόμοια με το M2 και ειδοποιό διαφορά την συνάρτηση ενεργοποίησης, παρουσίασε μια φανερά πιο ομαλή καμπύλη εμπειρικού σφάλματος τόσο των δεδομένων εκπαίδευσης όσο και των δεδομένων επικύρωσης. Ταυτόχρονα παρατηρείται μειωμένη απόσταση μεταξύ των δύο καμπυλών σε σύγκριση με το M2.

Το μοντέλο M4 (**Γράφημα 3-1.δ, Γράφημα 3-2.δ**), εξετάστηκε η περίπτωση μείωσης των κρυφών επιπέδων, και άρα των συνολικών νευρώνων, σε σύγκριση με το M3. Η αλλαγή αυτή επέφερε αύξηση στη διακύμανση του εμπειρικού σφάλματος των δεδομένων επικύρωσης, και ταυτόχρονα μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών σε σύγκριση με το M3.

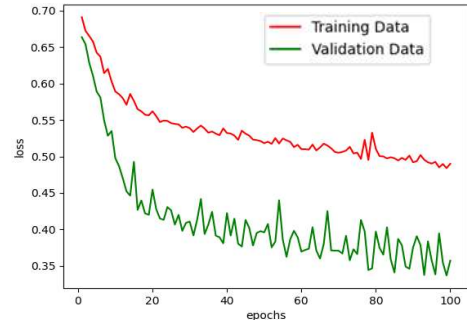
Για το μοντέλο M5 (**Γράφημα 3-1.ε, Γράφημα 3-2.ε**), κατά το οποίο εξετάστηκε η περαιτέρω μείωση των κρυφών επιπέδων σε ένα, η μείωση των νευρώνων και η επιλογή διαφορετικής συνάρτησης βελτιστοποίησης σε σύγκριση με το M4, παρατηρείται μεγάλη διακύμανση του εμπειρικού σφάλματος των δεδομένων επικύρωσης, παρότι οι τιμές των δύο καμπυλών φαίνεται να βρίσκονται πολύ κοντά. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η καμπύλη των δεδομένων επικύρωσης δεν βρίσκεται πάντα πιο χαμηλά από την καμπύλη των δεδομένων εκπαίδευσης επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη του φαινομένου υπερεκπαίδευσης στο μοντέλο.

Στο μοντέλο M6 (**Γράφημα 3-1.στ, Γράφημα 3-2.στ**), με παρόμοια χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικής με το M2, δύο επίπεδα κρυφών νευρώνων, παρότι παρουσιάζει τη βέλτιστη τιμή της ελάχιστης ακρίβειας και μια φανερά ομαλή καμπύλη εμπειρικού σφάλματος τόσο των δεδομένων εκπαίδευσης όσο και των δεδομένων επικύρωσης, δεν επιτυγχάνεται μειωμένη

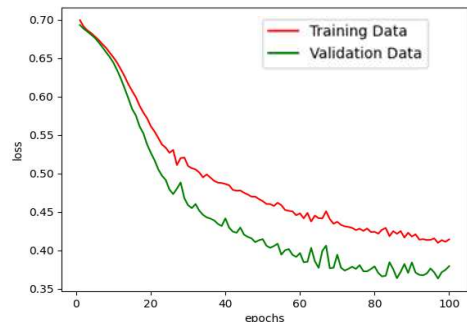
απόσταση μεταξύ των δύο καμπυλών.



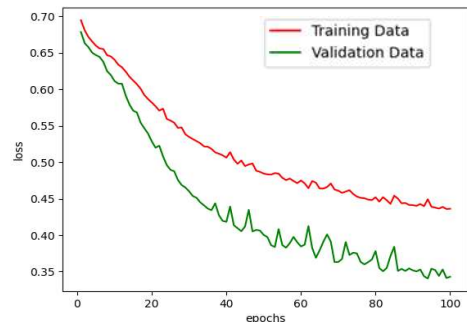
(α)



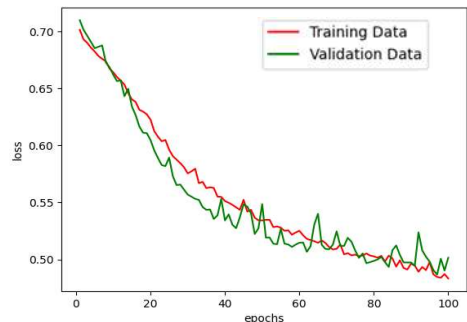
(β)



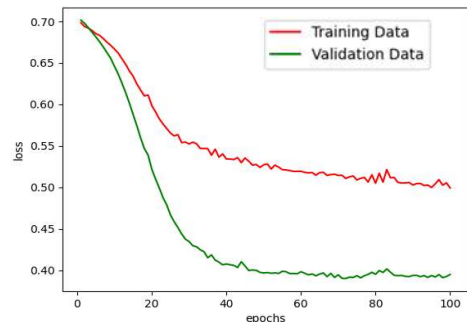
(γ)



(δ)

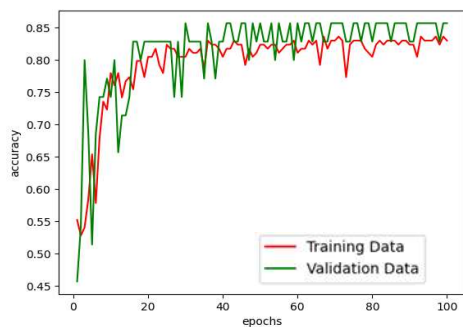


(ε)

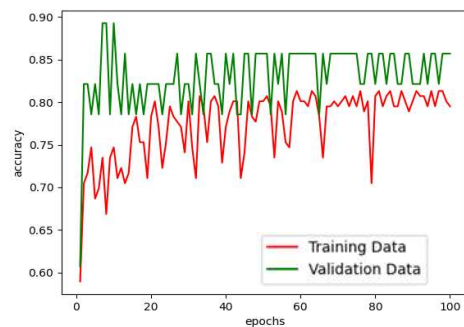


(στ)

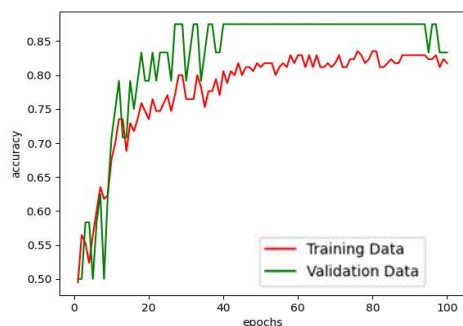
Γράφημα 3-1. Καμπύλη εμπειρικού σφάλματος συναρτήσει των εποχών του αλγορίθμου ΤΝΔ για καθένα από τα μοντέλα Μ1-6 (α-στ).



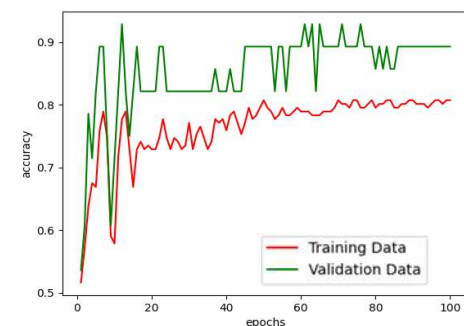
(α)



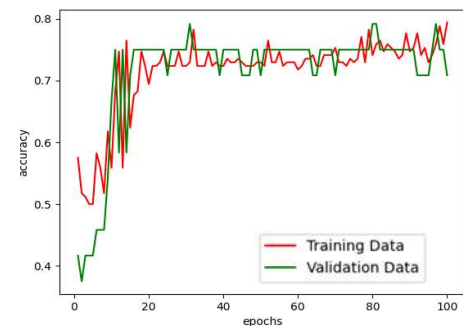
(β)



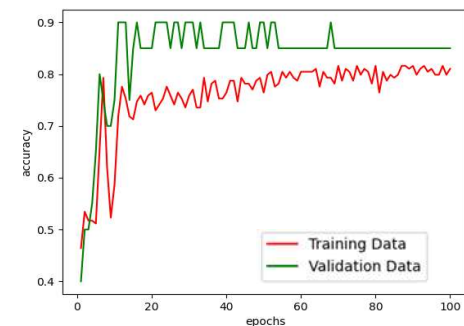
(γ)



(δ)



(ε)



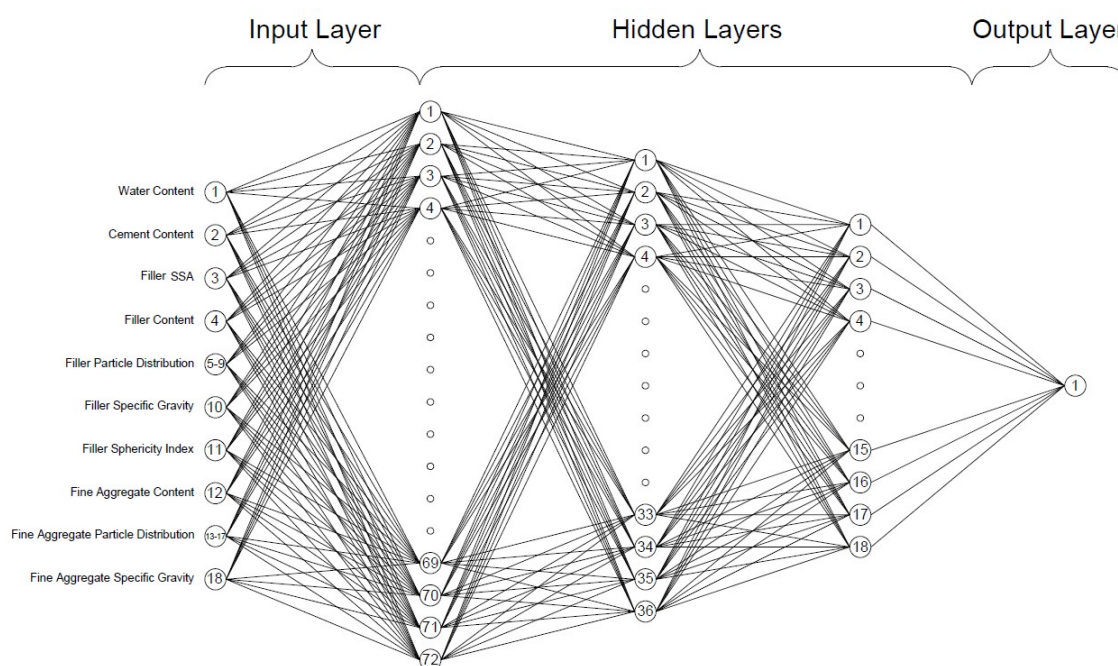
(στ)

Γράφημα 3-2. Καμπύλη ακρίβειας συναρτήσει των εποχών του αλγορίθμου ΤΝΔ για καθένα από τα μοντέλα Μ1-6 (α-στ).

Εξετάζοντας τα παραπάνω γραφήματα (Γράφημα 3-1 & Γράφημα 3-2), το μοντέλο Μ3 επιλέχτηκε ως αυτό με τη βέλτιστη αρχιτεκτονική. Στο διάγραμμα απώλειας – εποχών επιτυγχάνει την ομαλότερη διάρθρωση των καμπύλων δεδομένων εκπαίδευσης και επικύρωσης εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα μοντέλα, επί προσθέτως η απόσταση των δύο καμπύλων στην κατάληξη του διαγράμματος είναι ικανοποιητική χωρίς η καμπύλη δεδομένων επικύρωσης να ξεπερνάει αυτή των δεδομένων εκπαίδευσης οπότε αποκλείεται το ενδεχόμενο

υπερεκπαίδευσης του μοντέλου. Το διάγραμμα ακρίβειας – εποχών παρουσιάζει αποδεκτή σταθερότητα κατά το πέρας των εποχών και βελτιωμένη ακρίβεια στην καμπύλη δεδομένων επικύρωσης εν συγκρίσει με την καμπύλη δεδομένων εκπαίδευσης.

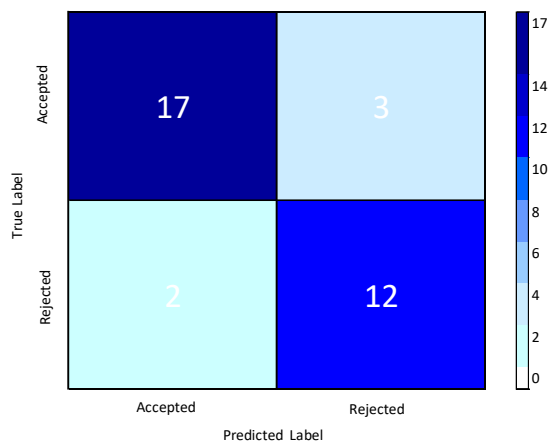
Το επιλεγμένο μοντέλο (M3) ακολουθεί αρχιτεκτονική με τρία κρυφά στρώματα νευρώνων που αποτελούνται από 72, 36 και 18 νευρώνες αντίστοιχα. Η φύση της μελέτης υπαγορεύει την ύπαρξη στρώματος εισόδου με 18 νευρώνες και στρώματος εξόδου με έναν μοναδικό νευρώνα. Ως συνάρτηση ενεργοποίησης του κάθε νευρώνα έχει χρησιμοποιηθεί η ReLU και ως συνάρτηση βελτιστοποίησης του μοντέλου έχει χρησιμοποιηθεί η Adamax. Επιπλέον τιμές υπερπαραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι η τιμή του ρυθμού εκμάθησης στο 0,004 και το ποσοστό των δεδομένων επικύρωσης με τιμή 12%. Η αρχιτεκτονική του μοντέλου παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3-2**.



Εικόνα 3-2. Η αρχιτεκτονική του βελτιστοποιημένου μοντέλου TNΔ.

Με τη χρήση της παραπάνω αρχιτεκτονικής και των προαναφερθέντων υπερπαραμέτρων, κατά τη διάρκεια εκπαίδευσης του μοντέλου έχει επιτευχθεί ελάχιστη και μέγιστη ακρίβεια 0,93 και 0,47 αντίστοιχα καθώς και μέγιστες και ελάχιστες απώλειες 0,69 και 0,31 αντίστοιχα. Κατά την διαδικασία αξιολόγησης των δεδομένων ελέγχου επιτεύχθηκε ορθός χαρακτηρισμός του

85% των συνθέσεων ως προς την ικανότητα τους να αποτελέσουν κατάλληλες αυτοσυμπυκνούμενες συνθέσεις για χρήση. Πιο συγκεκριμένα τρεις αποδεκτές συνθέσεις χαρακτηρίστηκαν από το μοντέλο σαν μη αποδεκτές ενώ δύο μη αποδεκτές συνθέσεις χαρακτηρίστηκαν ως αποδεκτές, τα αποτελέσματα αποτυπώνονται γραφικά στην Εικόνα 3-3.

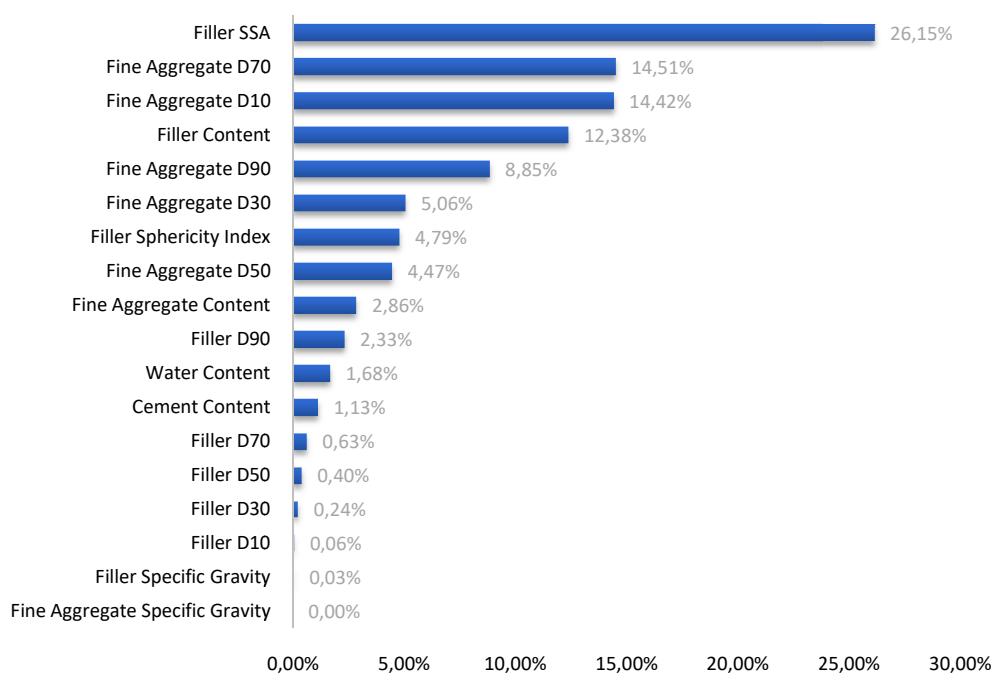


Εικόνα 3-3. Πίνακας σύγκρισης που απεικονίζει τα αποδεκτά και απορριφθέντα αποτελέσματα.

4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Η αξιολόγηση των μεταβλητών εισόδου ενός μοντέλου ΤΝΔ αποτελεί το τελευταίο βήμα για τη μόρφωση και αξιολόγησή του. Η διαδικασία αξιολόγησης περιλαμβάνει τον υπολογισμό του βαθμού επιρροής που ασκεί η κάθε μεταβλητή εισόδου στη λήψη αποφάσεων του μοντέλου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός επιρροής μιας μεταβλητής εισόδου τόσο μεγαλύτερη είναι η επιρροή που ασκεί στο μοντέλο κατά την πρόβλεψη του αποτελέσματος.

Στη συγκεκριμένη μελέτη για την αξιολόγηση των μεταβλητών εισόδου έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές του SHAP (Shapley Additiveex Planations) Importance. Μετά τον υπολογισμό των τιμών επιρροής της κάθε μεταβλητής οι τιμές έχουν κανονικοποιηθεί σε κλίμακα του εκατό για την ευκολότερη ταξινόμηση και κατανόηση τους. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας φαίνονται στο **Γράφημα 4-1**.



Γράφημα 4-1. Διάγραμμα βαθμού επιρροής μεταβλητών εισόδου *Shapley Additiveex Planations (SHAP) importance*.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι μεγαλύτερη επιρροή στη λήψη απόφασης του μοντέλου φέρει η ειδική επιφάνεια (SSA) του πληρωτικού υλικού που έχει

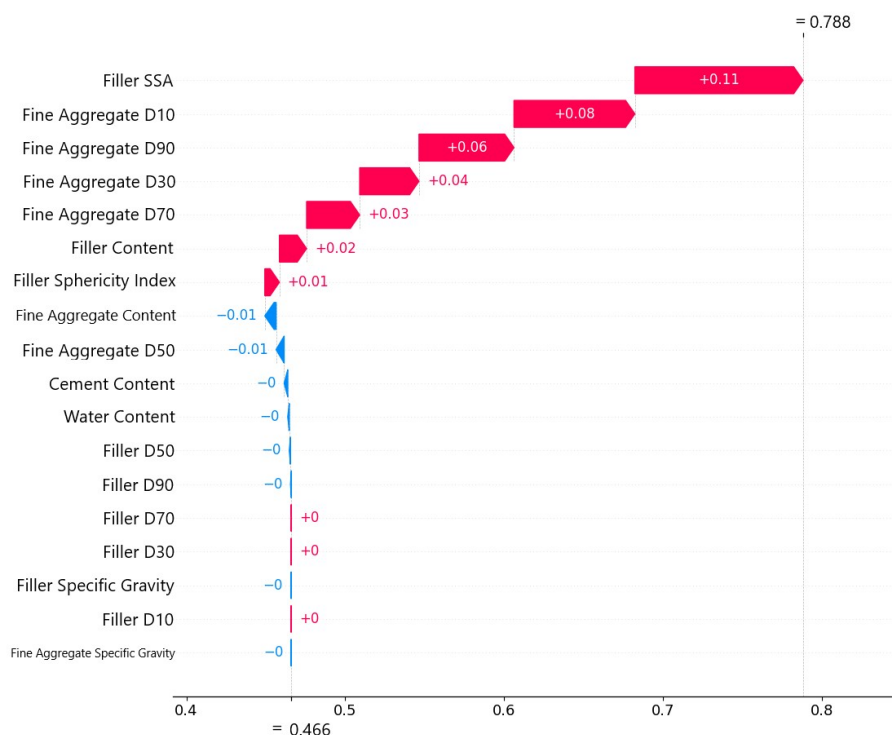
χρησιμοποιηθεί στο μείγμα (26,15%). Συμπερασματικά, χαρακτηριστικά όπως το αυξημένο πλαστικό ιξώδες και η αυξημένη αντοχή στον διαχωρισμό μπορούν να αποδοθούν σε υψηλότερο SSA. Η παραπάνω αύξηση του SSA θα οδηγήσει το μείγμα σε μειωμένη ικανότητα ροής λόγω υψηλότερης απορρόφησης της επιφάνειας των σωματιδίων σε συνδυασμό με μικρότερες αποστάσεις μεταξύ τους, για την αντιμετώπιση του παραπάνω φαινομένου μπορεί να εισαχθούν κατάλληλα χημικά πρόσμικτα[131]. Παρόλο που η προσθήκη πληρωτικού επηρεάζει τη ρεολογία του μείγματος δεν είναι σαφές αν επηρεάζει ευεργετικά ή μη την εργασιμότητα του ΑΣΣ και ΑΣΚ [26]. Σημαντική επιρροή στην επιλογή του μοντέλου εμφανίζει και η περιεκτικότητα σε υλικό πλήρωσης με βαθμό επιρροή 12,38%. Το παραπάνω συμπέρασμα είναι αναμενόμενο καθώς η αύξηση της περιεκτικότητας σε λεπτό υλικό πλήρωσης αυξάνει τον όγκο της πάστας ο οποίος ενισχύει την αντίσταση στο διαχωρισμό. Ένα μείγμα με εξαιρετικά χαμηλό ιξώδες απαιτεί μείωση της περιεχόμενης πάστας για να επιτύχει τις απαιτούμενες ρεολογικές ιδιότητες (EFNARC 2005). Μέρη της πάστας του μείγματος αποτελούν το νερό και το τσιμέντο, των οποίων ο βαθμός επιρροής στο μοντέλο, 1,68% και 1,13% αντίστοιχα, επεξηγείται με τις ανωτέρω παρατηρήσεις. Επιπλέον η περιεκτικότητα σε νερό επηρεάζει τη ρεολογία των τσιμεντοειδών στο μείγμα χωρίς να απαιτείται κάποια συσχέτιση με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο ή αδρανή [132]. Για δεδομένη περιεκτικότητα σε νερό η χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο τείνει να οδηγήσει τα μίγματα σε χαμηλή εργασιμότητα ενώ αντίθετα υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο οδηγεί σε εξαιρετική συνοχή αλλά και αυξημένο ιξώδες.

Αισθητή επιρροή στην επιλογή του μοντέλου ασκεί και ο δείκτης σφαιρικότητας του πληρωτικού 4,79%. Η ρεολογική συμπεριφορά του κονιάματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το σχήμα των λεπτών σωματιδίων που το ενσωματώνουν, τα σωματίδια ανάλογα με το σχήμα του αυξάνουν ή μειώνουν τη διασωματιδιακή τριβή με αποτέλεσμα να επηρεάζουν το ιξώδες του μίγματος. Παράλληλα για την επίτευξη των επιθυμητών τάσεων διαρροής η απαίτηση για χρήση υπερρευστοποιητή αυξάνεται όσο μειώνεται η σφαιρικότητα των σωματιδίων [133].

Τέλος η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων (D10-D90) επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα του μοντέλου. Συγκεκριμένα η κατανομή μεγέθους σωματιδίων του λεπτού αδρανούς, η οποία σχετίζεται και με το σκελετό του αδρανούς αλλά και την πυκνότητά

συσκευασίας αποτελεί κρίσιμη μεταβλητή επιρροής με ποσοστά (4,47%-14,51%). Μόνο το ανώτερο όριο της κοκομετρίας του υλικού πλήρωσης (D90) φαίνεται να ασκεί σημαντική επιρροή στην επιλογή του μοντέλου (2,33%) ενώ η επιρροή των υπολοίπων ορίων κοκκομέτρίας του πληρωτικού καθώς και τα ειδικά βάρη τόσο του πληρωτικού όσο και των λεπτών αδρών φαίνονται να παρουσιάζουν μηδαμινή επιρροή στις επιλογές του μοντέλου.

Στο **Γράφημα 4-2** παρουσιάζονται οι τιμές επιρροής SHAP της κάθε μεταβλητής εισόδου. Το διάγραμμα έρχεται να συμπληρώσει το διάγραμμα της Εικόνας 4-1 και απεικονίζει πως επηρεάζει η αύξηση της τιμής μιας μεταβλητής το αποτέλεσμα του μοντέλου. Είναι σαφές ότι η αύξηση του SSA, της περιεκτικότητας ή της σφαιρικότητας των σωματιδίων του υλικού πλήρωσης έχει ευεργετική επίδραση στο μοντέλο, όπως έχει και η αύξηση της κοκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών σωματιδίων. Ελαφρώς αρνητική επίδραση φαίνεται να έχει η περιεκτικότητα σε λεπτά συσσωματώματα ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές δεν δείχνουν να επηρεάζουν το αποτέλεσμα.



Γράφημα 4-1. Γράφημα καταρράκτη για τις τιμές SHAP κάθε μεταβλητής εισόδου.3

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα αυτοσυμπυκνούμενα μίγματα σκυροδέματος και κονιάματος έχουν γίνει αρκετά δημοφιλή δομικά υλικά προσφέροντας πολλαπλά ωφέλησε μια πληθώρα εφαρμογών στον τομέα των κατασκευών. Παράλληλα, τα μοντέλα τεχνικών νευρωνικών δικτύων έχουν αποτελέσει πολύ σημαντικά και αξιόπιστα εργαλεία σε διάφορους τομείς και ειδικότητες, συμπεριλαμβανομένων των δομικών υλικών και της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού.

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη κατασκευής ενός μοντέλου πρόβλεψης της αυτοσυμπυκνωσιμότητας μιγμάτων σκυροδέματος και κονιάματος, η οποία διεξήχθη κάνοντας χρήση της μεθόδου των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διερεύνηση δημιουργήθηκε, εκπαιδεύτηκε και εφαρμόστηκε ένα μοντέλο για τον χαρακτηρισμό πιθανών μιγμάτων αυτοσυμπύκνωσης ως κατάλληλα ή μη κατάλληλα, δηλαδή την πρόβλεψη της ικανότητας ενός μίγματος κονιάματος γνωστής σύνθεσης να επιτυγχάνει βασικές ιδιότητες αυτοσυμπύκνωσης σύμφωνα με τις οδηγίες EFNARC.

Από τη διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων και υπερπαραμέτρων, προέκυψε το βέλτιστο μοντέλο, το οποίο χαρακτηρίζεται από 3 κρυφά επίπεδα, 100 εποχές και ρυθμό εκμάθησης ίσο με 0,004. Το προτεινόμενο μοντέλο δοκιμάστηκε σε μια πληθώρα δεδομένων προερχόμενα από τη βιβλιογραφία, καθώς και δεδομένων που παρήχθησαν στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Το εν λόγω μοντέλο απέδωσε ακρίβεια πρόβλεψης έως και 85%, χωρίς κίνδυνο υπερπροσαρμογής ή υποπροσαρμογής, γεγονός που το καθιστά ένα αξιόπιστο εργαλείο ικανό να συμβάλλει στη σημαντική μείωση του χρόνου και του όγκου των πειραματικών μετρήσεων που συνήθως απαιτούνται για την ανάπτυξη κατάλληλων μιγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και κονιάματος.

Αναφορικά με τη σημαντικότητα των εξεταζόμενων μεταβλητών εισόδου, από τη μελέτη προέκυψε ότι η ειδική επιφάνεια του πληρωτικού υλικού, η κατανομή μεγέθους της κοκκομετρίας των αδρανών, και η περιεκτικότητα σε λεπτά υλικά πλήρωσης αποτελούν τις σημαντικότερες μεταβλητές πρόβλεψης. Ταυτόχρονα παρουσιάζει ενδιαφέρον πως η επιρροή των συγκεκριμένων μεταβλητών στη ρεολογία του ΑΣΚ ήταν ήδη γνωστή, όμως μέσα από τη

μοντελοποίηση που δημιουργήθηκε παρατηρείται και μια ιεράρχηση σε αυτές.

Τέλος, παρά την υψηλή αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μοντέλου, κρίνεται ότι ο εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων του με πρόσθετα πειραματικά αποτελέσματα θα συμβάλλει στη βελτίωση της ακρίβειας και την αύξηση της αξιοπιστίας του. Απαιτείται, συνεπώς, περαιτέρω έρευνα αναφορικά με τη συλλογή επαρκούς όγκου δεδομένων και τον προσδιορισμό κρίσιμων μεταβλητών που απασχολούν τον κατασκευαστικό τομέα, και ειδικότερα τα δομικά υλικά που χαρακτηρίζονται από μη γραμμική συμπεριφορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Van Damme, H. Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and concrete research* **2018**, *112*, 5-24, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.002>.
2. Howes, R.; Hadi, M.N.; South, W. Concrete strength reduction due to over compaction. *Construction and Building Materials* **2019**, *197*, 725-733, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.234>.
3. Κανονισμός, Ε.Α. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας. **2000**, doi:<https://oasp.gr/kanonismoι/ellinikos-antiseismikos-kanonismos-2000>.
4. Rwamamara, R.; Simonsson, P. Health and safety in concrete casting processes. In Proceedings of the Annual ARCOM Conference: 07/09/2009-09/09/2009, 2009; pp. 1253-1262.
5. Goodier, C.I. Development of self-compacting concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings* **2003**, *156*, 405-414, doi:<https://doi.org/10.1680/stbu.2003.156.4.405>.
6. Okamura, H.; Ouchi, M. Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology* **2003**, *1*, 5-15, doi:<https://doi.org/10.3151/jact.1.5>.
7. Okamura, H. Self-compacting high-performance concrete. *Concrete international* **1997**, *19*, 50-54.
8. Concrete, S.-C. The European guidelines for self-compacting concrete. *BIBM, et al* **2005**, *22*, 563.
9. Khayat, K.H.; De Schutter, G. *Mechanical properties of self-compacting concrete*; Springer: 2014; Volume 14.
10. Courard, L.; Bissonnette, B. Compatibility performance as a fundamental requirement for the repair of concrete structures with self-compacting repair mortars. In Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2007.
11. Kubens, S.; Wallevik, O. Self-compacting mortar for concrete furniture and design objects. *Proceedings of SCC2010, Montreal* **2010**.
12. Tuyan, M.; Zhang, L.V.; Nehdi, M.L. Development of sustainable preplaced aggregate concrete with alkali-activated slag grout. *Construction and Building Materials* **2020**, *263*, 120227, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120227>.
13. Nepomuceno, M.C.; Pereira-de-Oliveira, L.; Lopes, S.M.R. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials* **2014**, *64*, 82-94, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.021>.
14. Rodríguez de Sensale, G.; Rodríguez Viacava, I.; Aguado, A. Simple and rational methodology for the formulation of self-compacting concrete mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering* **2016**, *28*, 04015116, doi:<https://doi.org/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001375>.
15. Τρέζος, Κ.Γ.; Σφήκας, Ι.Π. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.
16. Shi, C.; Wu, Z.; Lv, K.; Wu, L. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* **2015**, *84*, 387-398, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079>.
17. Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος, Τεχνική Οδηγία 5 - Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (2014).
18. Παπανικολάου Κ.Γ., Τριανταφύλλου Α.Χ., Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα: Ανασκόπηση, Ιδιότητες και Προοπτικές στην Ελλάδα, Πρακτικά 14ου Συνεδρίου Σκυροδέματος Κως 2003.
19. Διαμαντώνης, Ν.Ι. Ιδιότητες πάστας τσιμέντου σε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. 2010.
20. Μακρής, Κ.Ε.; Σμαργιανάκη, Δ.Ν. Η επίδραση του Μετακαολίτη στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιοτητες και στην ανθεκτικότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. 2012.
21. Σαραβάκος, Γ.Δ. **1973. Ροή Ρευστών. Ε.Μ.Π., Αθήνα.**

22. Chhabra, R.P. Non-Newtonian fluids: an introduction. *Rheology of complex fluids* **2010**, 3-34, doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6_1.
23. Li, M.; Han, J.; Zhou, Y.; Yan, P. A rheological model for evaluating the behavior of shear thickening of highly flowable mortar. *Molecules* **2021**, *26*, 1011, doi:<https://doi.org/10.3390/molecules26041011>.
24. Alves, M.; Oliveira, P.; Pinho, F. Numerical methods for viscoelastic fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics* **2021**, *53*, 509-541, doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060107>.
25. Rasekh, H.; Joshaghani, A.; Jahandari, S.; Aslani, F.; Ghodrat, M. Rheology and workability of SCC. In *Self-compacting concrete: materials, properties and applications*; Elsevier: 2020; pp. 31-63.
26. Yahia, A.; Tanimura, M.; Shimoyama, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. *Cement and concrete Research* **2005**, *35*, 532-539, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.008>.
27. EN 12350-8:2010, "Testing fresh concrete – Part 8: Slump-flow test", 2010.
28. EN 12350-10:2010, "Testing fresh concrete – Part 10: L-box test", 2010.
29. EN 12350-12:2010, "Testing fresh concrete – Part 12: J-Ring test", 2010.
30. EN 12350-6:2009, "Testing fresh concrete – Part 6: Density", 2009.
31. EN 12350-7:2009, "Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods", 2009.
32. Felekoğlu, B.; Tosun, K.; Baradan, B.; Altun, A.; Uyulgan, B. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and concrete research* **2006**, *36*, 1719-1726, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>.
33. Bouziani, T.; Benmounah, A. Correlation between v-funnel and mini-slump test results with viscosity. *KSCE Journal of Civil Engineering* **2013**, *17*, 173-178, doi:<https://doi.org/10.1007/s12205-013-1569-1>.
34. Bouvet, A.; Ghorbel, E.; Bennacer, R. The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study. *Cement and concrete research* **2010**, *40*, 1517-1523, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.06.005>.
35. KOKADO, T.; MIYAGAWA, T. Study on a method of obtaining rheological coefficients of high-flow concrete from slump flow test. *Doboku Gakkai Ronbunshu* **1999**, *1999*, 113-129.
36. Roussel, N.; Coussot, P. "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow. *Journal of rheology* **2005**, *49*, 705-718, doi:<http://dx.doi.org/10.1122/1.1879041>.
37. Tregger, N.; Ferrara, L.; Shah, S.P. Identifying viscosity of cement paste from mini-slump-flow test. *ACI Materials Journal* **2008**, *105*, 558.
38. Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A. *Deep learning*; MIT press: 2016.
39. Rasamoelina, A.D.; Adjailia, F.; Sinčák, P. A review of activation function for artificial neural network. In *Proceedings of the 2020 IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*, 2020; pp. 281-286.
40. Ünal, H.T.; Başçiftçi, F. Evolutionary design of neural network architectures: a review of three decades of research. *Artificial Intelligence Review* **2022**, 1-80, doi:<https://doi.org/10.1007/s10462-021-10049-5>.
41. Domone, P. Proportioning of self-compacting concrete—the UCL method. **2009**.
42. EDAMATSU, Y.; NISHIDA, N.; OUCHI, M. A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles. In *Proceedings of the Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999)*, 1999; pp. 309-320.
43. Okamura, H.; Ozawa, K. Mix design for self-compacting concrete. *Concrete library of JSCE* **1995**, *25*, 107-120, doi:<http://dx.doi.org/10.1201/9781482271782>.
44. Ashish, D.K.; Verma, S.K. An overview on mixture design of self-compacting concrete. *Structural Concrete* **2019**, *20*, 371-395, doi:<http://dx.doi.org/10.1002/suco.201700279>.

45. Hwang, C.; Tsai, C. The effect of aggregate packing types on engineering properties of self-consolidating concrete. *SCC* **2005**, doi:<http://dx.doi.org/10.1617/2912143624.035>.
46. Petersson, O.; Billberg, P.; Van, B. A model for self-compacting concrete. In *Production methods and workability of concrete*; CRC Press: 2004; pp. 495-504.
47. Kheder, G.F.; Al Jadiri, R.S. New method for proportioning self-consolidating concrete based on compressive strength requirements. *ACI Materials Journal* **2010**, *107*, 490.
48. Bui, V.K.; Akkaya, Y.; Shah, S.P. Rheological model for self-consolidating concrete. *Materials Journal* **2002**, *99*, 549-559.
49. Sedran, T.d.; De Larrard, F.; Hourst, F.; Contamines, C. Mix design of self-compacting concrete (SCC). In *Production methods and workability of concrete*; CRC Press: 2004; pp. 451-462.
50. Sedran, T.; De Larrard, F. Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. In Proceedings of the Proceedings 1st SCC Symp, CBI Sweden, RILEM PRO7, 1999; pp. 321-332.
51. Su, N.; Hsu, K.-C.; Chai, H.-W. A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and concrete research* **2001**, *31*, 1799-1807, doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00566-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00566-X).
52. Su, N.; Miao, B. A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. *Cement and Concrete Composites* **2003**, *25*, 215-222, doi:[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00013-6).
53. Hwang, C.-L.; Hung, M.-F. Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete. *Construction and building materials* **2005**, *19*, 619-626, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.003>.
54. Chen, Y.-Y.; Tuan, B.L.A.; Hwang, C.-L. Effect of paste amount on the properties of self-consolidating concrete containing fly ash and slag. *Construction and Building Materials* **2013**, *47*, 340-346, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.050>.
55. Brouwers, H.; Radix, H. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. *Cement and concrete research* **2005**, *35*, 2116-2136, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.002>.
56. Khaleel, O.; Razak, H.A. Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate. *Materials & Design* **2014**, *53*, 691-700, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.072>.
57. Yoshinobu EDAMATSU, T.S.; OUCHI, M. A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests. In Proceedings of the PRO 33: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003; p. 345.
58. Domone, P.; Jin, J.; Chai, H. Optimum mix proportioning of self-compacting concrete. In *Innovation in Concrete Structures: Design and Construction*; Thomas Telford Publishing: 1999; pp. 277-285.
59. Sonebi, M. Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete research* **2004**, *34*, 1199-1208, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.022>.
60. Khayat, K.; Ghezal, A.; Hadriche, M. Factorial design model for proportioning self-consolidating concrete. *Materials and Structures* **1999**, *32*, 679-686, doi:<http://dx.doi.org/10.1007/BF02481706>.
61. Khayat, K.; Ghezal, A.; Hadriche, M. Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete. *Materials and structures* **2000**, *33*, 338-344, doi:<http://dx.doi.org/10.1007/BF02479705>.
62. Bouziani, T. Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach. *Construction and Building Materials* **2013**, *49*, 308-314, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.039>.
63. Ozbay, E.; Oztas, A.; Baykasoglu, A.; Ozbebek, H. Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method. *Construction and building materials* **2009**, *23*, 694-702, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.014>.

64. Nepomuceno, M.; Oliveira, L.; Lopes, S.M.R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials* **2012**, *26*, 317-326, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.027>.
65. Dinakar, P. Design of self-compacting concrete with fly ash. *Magazine of Concrete Research* **2012**, *64*, 401-409.
66. Li, J.; Yin, J.; Zhou, S.; Li, Y. Mix proportion calculation method of self-compacting high performance concrete. In Proceedings of the Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating SCC, 2005; pp. 199-205.
67. Alyamaç, K.E.; Ince, R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials* **2009**, *23*, 1201-1210, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012>.
68. Wu, Z.; Zhang, Y.; Zheng, J.; Ding, Y. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials* **2009**, *23*, 2087-2092, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.023>.
69. Dinakar, P.; Sethy, K.P.; Sahoo, U.C. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag. *Materials & Design* **2013**, *43*, 161-169, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.049>.
70. Dinakar, P.; Manu, S. Concrete mix design for high strength self-compacting concrete using metakaolin. *Materials & Design* **2014**, *60*, 661-668, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.053>.
71. Saak, A.W.; Jennings, H.M.; Shah, S.P. New methodology for designing self-compacting concrete. *Materials Journal* **2001**, *98*, 429-439.
72. Abo Dhaheer, M.S.; Al-Rubaye, M.M.; Alyhya, W.S.; Karihaloo, B.L.; Kulasegaram, S. Proportioning of self-compacting concrete mixes based on target plastic viscosity and compressive strength: part I-mix design procedure. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* **2016**, *5*, 199-216, doi:<http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2015.1039625>.
73. Van Khanh, B.; Montgomery, D. Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume. In Proceedings of the Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999), 1999; pp. 373-384.
74. Nielsson, I.; Wallevik, O. Mix Design of HS-SCC and Practical application. In Proceedings of the Self-Compacting Concrete. Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium. Eds. Wallevik O, Nielsson I, RILEM Publication, 2003; pp. 506-513.
75. Ferrara, L.; Park, Y.-D.; Shah, S.P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Cement and concrete research* **2007**, *37*, 957-971, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.014>.
76. Deeb, R.; Karihaloo, B.L. Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes. *Magazine of Concrete Research* **2013**, *65*, 546-556, doi:<https://doi.org/10.1680/macr.12.00164>.
77. Wu, Q.; An, X. Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste. *Construction and Building Materials* **2014**, *53*, 642-651, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.008>.
78. Nie, D.; An, X. Optimization of SCC mix at paste level by using numerical method based on a paste rheological threshold theory. *Construction and Building Materials* **2016**, *102*, 428-434, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.195>.
79. Abo Dhaheer, M.S.; Al-Rubaye, M.M.; Alyhya, W.S.; Karihaloo, B.L.; Kulasegaram, S. Proportioning of self-compacting concrete mixes based on target plastic viscosity and compressive strength: Part II-experimental validation. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* **2016**, *5*, 217-232, doi:<http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2015.1036952>.

80. Cepuritis, R.; Jacobsen, S.; Pedersen, B.; Mørtzell, E. Crushed sand in concrete—effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology. *Cement and concrete composites* **2016**, *71*, 26-41, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.004>.
81. Khademi, F.; Akbari, M.; Jamal, S.M.; Nikoo, M. Multiple linear regression, artificial neural network, and fuzzy logic prediction of 28 days compressive strength of concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* **2017**, *11*, 90-99, doi:<https://doi.org/10.1007/s11709-016-0363-9>.
82. Gupta, R.; Kewalramani, M.A.; Goel, A. Prediction of concrete strength using neural-expert system. *Journal of materials in civil engineering* **2006**, *18*, 462-466, doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:3\(462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:3(462)).
83. Tenza-Abril, A.J.; Villacampa, Y.; Solak, A.M.; Baeza-Brotons, F. Prediction and sensitivity analysis of compressive strength in segregated lightweight concrete based on artificial neural network using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials* **2018**, *189*, 1173-1183, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.096>.
84. Altun, F.; Kişi, Ö.; Aydin, K. Predicting the compressive strength of steel fiber added lightweight concrete using neural network. *Computational Materials Science* **2008**, *42*, 259-265, doi:<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.07.011>.
85. Xu, J.; Zhao, X.; Yu, Y.; Xie, T.; Yang, G.; Xue, J. Parametric sensitivity analysis and modelling of mechanical properties of normal-and high-strength recycled aggregate concrete using grey theory, multiple nonlinear regression and artificial neural networks. *Construction and Building Materials* **2019**, *211*, 479-491, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.234>.
86. Öztaş, A.; Pala, M.; Özbay, E.a.; Kanca, E.a.; Çağlar, N.; Bhatti, M.A. Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network. *Construction and building materials* **2006**, *20*, 769-775, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.054>.
87. Liu, G.; Zheng, J. Prediction model of compressive strength development in concrete containing four kinds of gelled materials with the artificial intelligence method. *Applied Sciences* **2019**, *9*, 1039, doi:<https://doi.org/10.3390/app9061039>.
88. Amin, M.N.; Javed, M.F.; Khan, K.; Shalabi, F.I.; Qadir, M.G. Modeling Compressive Strength of Eco-Friendly Volcanic Ash Mortar Using Artificial Neural Networking. *Symmetry* **2021**, *13*, 2009, doi:<https://doi.org/10.3390/sym13112009>.
89. Hoła, J.; Schabowicz, K. Application of artificial neural networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive tests. *Journal of civil Engineering and Management* **2005**, *11*, 23-32, doi:<https://doi.org/10.3846/13923730.2005.9636329>.
90. Trtnik, G.; Kavčič, F.; Turk, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics* **2009**, *49*, 53-60, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.05.001>.
91. Onal, O.; Ozturk, A.U. Artificial neural network application on microstructure–compressive strength relationship of cement mortar. *Advances in Engineering Software* **2010**, *41*, 165-169, doi:<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.09.004>.
92. Paul, S.C.; Panda, B.; Liu, J.; Zhu, H.-H.; Kumar, H.; Bordoloi, S.; Garg, A. Assessment of flexural and splitting strength of fiber-reinforced concrete using artificial intelligence. *Advances in Civil Engineering Materials* **2019**, *8*, 385-399, doi: 10.1520/ACEM20190030
93. Behnood, A.; Verian, K.P.; Gharehveran, M.M. Evaluation of the splitting tensile strength in plain and steel fiber-reinforced concrete based on the compressive strength. *Construction and Building Materials* **2015**, *98*, 519-529, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.124>.
94. Balf, F.R.; Kordkheili, H.M.; Kordkheili, A.M. A new method for predicting the ingredients of self-compacting concrete (SCC) including fly ash (FA) using data envelopment analysis (DEA). *Arabian Journal for Science and Engineering* **2021**, *46*, 4439-4460, doi:<https://doi.org/10.1007/s13369-020-04927-3>.
95. Sonebi, M.; Grünewald, S.; Cevik, A.; Walraven, J. Modelling fresh properties of self-compacting

- concrete using neural network technique. *Computers and Concrete* **2016**, *18*, 903-920.
96. Kaloop, M.R.; Samui, P.; Shafeek, M.; Hu, J.W. Estimating slump flow and compressive strength of self-compacting concrete using emotional neural networks. *Applied Sciences* **2020**, *10*, 8543, doi:<https://doi.org/10.3390/app10238543>.
 97. Haruna, S.; Malami, S.I.; Adamu, M.; Usman, A.; Farouk, A.; Ali, S.I.A.; Abba, S. Compressive strength of self-compacting concrete modified with rice husk ash and calcium carbide waste modeling: a feasibility of emerging emotional intelligent model (EANN) versus traditional FFNN. *Arabian Journal for Science and Engineering* **2021**, *46*, 11207-11222, doi:<https://doi.org/10.1007/s13369-021-05715-3>.
 98. Asteris, P.; Kolovos, K.; Douvika, M.; Roinos, K. Prediction of self-compacting concrete strength using artificial neural networks. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **2016**, *20*, s102-s122, doi:<https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1246693>.
 99. Pazouki, G.; Golafshani, E.M.; Behnood, A. Predicting the compressive strength of self-compacting concrete containing Class F fly ash using metaheuristic radial basis function neural network. *Structural Concrete* **2022**, *23*, 1191-1213, doi:<https://doi.org/10.1002/suco.202000047>.
 100. Du, G.; Bu, L.; Hou, Q.; Zhou, J.; Lu, B. Prediction of the compressive strength of high-performance self-compacting concrete by an ultrasonic-rebound method based on a GA-BP neural network. *Plos one* **2021**, *16*, e0250795, doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250795>.
 101. Uysal, M.; Tanyildizi, H. Predicting the core compressive strength of self-compacting concrete (SCC) mixtures with mineral additives using artificial neural network. *Construction and Building Materials* **2011**, *25*, 4105-4111, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.108>.
 102. Mashhadban, H.; Kutanaei, S.S.; Sayarinejad, M.A. Prediction and modeling of mechanical properties in fiber reinforced self-compacting concrete using particle swarm optimization algorithm and artificial neural network. *Construction and Building Materials* **2016**, *119*, 277-287, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.034>.
 103. Martins, F.F.; Camões, A. Prediction of restrained shrinkage crack width of slag mortar composites using data mining techniques. *Matéria (Rio de Janeiro)* **2019**, *24*, doi:<https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0852>.
 104. Kounadis, A.; Badogiannis, E.; Retsa, N.; Angelopoulos, P.; Marinos, I. Hydration Heat, Rheology, and Strength of Self-Compacting Sustainable Mortars Containing Alternative Filler Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering* **2022**, *34*, 04022320, doi:[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004487](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004487).
 105. Wadell, H. Sphericity and roundness of rock particles. *The Journal of Geology* **1933**, *41*, 310-331.
 106. Anagnostopoulos, N.S., "Mechanical properties and durability of self-compacting concretes (SCC) produced with greek materials", PhD thesis, 2009, Xanthi, Greece: Democritus University of Thrace.
 107. Arslan, F.; Benli, A.; Karatas, M. Effect of high temperature on the performance of self-compacting mortars produced with calcined kaolin and metakaolin. *Construction and Building Materials* **2020**, *256*, 119497, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119497>.
 108. Benli, A.; Karataş, M.; Bakir, Y. An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials* **2017**, *144*, 552-562, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.228>.
 109. Benli, A.; Karataş, M.; Gurses, E. Effect of sea water and MgSO₄ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume. *Construction and Building Materials* **2017**, *146*, 464-474, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.108>.
 110. Benli, A.; Karatas, M.; Toprak, H.A. Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures.

- Construction and Building Materials* **2020**, *239*, 117895, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117895>.
111. Benli, A.; Turk, K.; Kina, C. Influence of silica fume and class F fly ash on mechanical and rheological properties and freeze-thaw durability of self-compacting mortars. *Journal of Cold Regions Engineering* **2018**, *32*, 04018009, doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000167](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000167).
 112. Çetinkaya, S.; Karakışla, M.; Özer, A.; Saçak, M. Conductive potassium feldspar/polyaniline composites prepared by in situ chemical polymerization. *Synthetic metals* **2007**, *157*, 702-707, doi:<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2007.07.014>.
 113. Nguyen, H.-A. Enhancement of engineering properties of slag-cement based self-compacting mortar with dolomite powder. *Journal of Building Engineering* **2019**, *24*, 100738, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100738>.
 114. de Matos, P.R.; Pilar, R.; Bromerchenkel, L.H.; Schankoski, R.A.; Gleize, P.J.; de Brito, J. Self-compacting mortars produced with fine fraction of calcined waste foundry sand (WFS) as alternative filler: fresh-state, hydration and hardened-state properties. *Journal of Cleaner Production* **2020**, *252*, 119871, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119871>.
 115. Liu, R.-x.; Poon, C.-s. Effects of red mud on properties of self-compacting mortar. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *135*, 1170-1178, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.052>.
 116. Kadhim, A.S.; Atiyah, A.A.; Salih, S.A. Properties of self-compacting mortar containing nano cement kiln dust. *Materials Today: Proceedings* **2020**, *20*, 499-504, doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.177>.
 117. Karatas, M.; Benli, A.; Arslan, F. The effects of kaolin and calcined kaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting mortars subjected to high temperatures. *Construction and Building Materials* **2020**, *265*, 120300, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120300>.
 118. Karataş, M.; Benli, A.; Ergin, A. Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials* **2017**, *150*, 467-479, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.220>.
 119. Khoshkbijari, R.K.; Samimi, M.F.; Mohammadi, F.; Talebitaher, P. Effects of Mica and Feldspar as partial cement replacement on the rheological, mechanical and thermal durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials* **2020**, *263*, 120149, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120149>.
 120. Khotbehsara, M.M.; Miyandehi, B.M.; Naseri, F.; Ozbakkaloglu, T.; Jafari, F.; Mohseni, E. Effect of SnO₂, ZrO₂, and CaCO₃ nanoparticles on water transport and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash: Experimental observations and ANFIS predictions. *Construction and Building Materials* **2018**, *158*, 823-834, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.067>.
 121. Shoukry, H.; Kotkata, M.; Abo-EL-Enein, S.; Morsy, M.; Shebl, S. Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nano metakaolin. *Construction and Building Materials* **2016**, *112*, 276-283, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.209>.
 122. Georgiadis, A., "Optimization of mix design, production and use of self-compacting concrete mixtures in industrial scale in Greece.", PhD thesis, 2010, Xanthi, Greece: Democritus University of Thrace.
 123. Gowda, M.R.; Narasimhan, M.; Karisiddappa. Development and study of the strength of self-compacting mortar mixes using local materials. *Journal of materials in civil engineering* **2011**, *23*, 526-532, doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000202](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000202).
 124. Güneyisi, E.; Gesoglu, M.; Ghanim, H.; İpek, S.; Taha, I. Influence of the artificial lightweight aggregate on fresh properties and compressive strength of the self-compacting mortars.

- Construction and Building Materials* **2016**, *116*, 151-158, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.140>.
125. Thakare, A.A.; Siddique, S.; Sarode, S.N.; Deewan, R.; Gupta, V.; Gupta, S.; Chaudhary, S. A study on rheological properties of rubber fiber dosed self-compacting mortar. *Construction and Building Materials* **2020**, *262*, 120745, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120745>.
 126. Chand, M.S.R.; Giri, P.S.N.R.; Kumar, P.R.; Kumar, G.R.; Raveena, C. Effect of self curing chemicals in self compacting mortars. *Construction and Building Materials* **2016**, *107*, 356-364, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.018>.
 127. Chu, S.; Kwan, A. Co-addition of metakaolin and silica fume in mortar: effects and advantages. *Construction and Building Materials* **2019**, *197*, 716-724, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.244>.
 128. Ouldkaoua, Y.; Benabed, B.; Abousnina, R.; Kadri, E.-H. Experimental study on the reuse of cathode ray tubes funnel glass as fine aggregate for developing an ecological self-compacting mortar incorporating metakaolin. *Journal of Building Engineering* **2020**, *27*, 100951, doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100951>.
 129. Cheboub, T.; Senhadji, Y.; Khelafi, H.; Escadeillas, G. Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self-compacting lightweight mortar containing olive kernel shells as aggregate. *Journal of Cleaner Production* **2020**, *249*, 119406, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119406>.
 130. Nasr, D.; Behforouz, B.; Borujeni, P.R.; Borujeni, S.A.; Zehtab, B. Effect of nano-silica on mechanical properties and durability of self-compacting mortar containing natural zeolite: Experimental investigations and artificial neural network modeling. *Construction and Building Materials* **2019**, *229*, 116888, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116888>.
 131. Berodier, E.; Scrivener, K. Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. *Journal of the American Ceramic Society* **2014**, *97*, 3764-3773, doi:<http://dx.doi.org/10.1111/jace.13177>.
 132. Mehta, P.K.; Monteiro, P. Concrete: microstructure, properties, and materials. *(No Title)* **2006**.
 133. Gesoğlu, M.; Güneyisi, E.; Kocabağ, M.E.; Bayram, V.; Mermerdaş, K. Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. *Construction and Building Materials* **2012**, *37*, 160-170, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092>.