



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ
ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ
ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΑΠΟΥΛΑ Κ. ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων:

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

Αθήνα, Ιούλιος 2021

ΣΧΜ ΜΔΕ 2021/01

Παπακωνσταντίνου Κ. Α. (2021).
Ανάπτυξη Μοντέλου Πρόβλεψης Ρεολογικών Χαρακτηριστικών Αυτοσυμπυκνούμενου
Κονιάματος με τη Μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία ΣΧΜ ΜΔΕ 2021/01
Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Papakonstantinou K A. (2020).
Development of a prediction model of Self-Compacting Mortar's rheological
characteristics using Artificial Neural Network
MSc Diploma Thesis ΣΧΜ ΜΔΕ 2021/01
School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	xi
Abstract.....	xiii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά περί Σκυροδέματος.....	1
1.2 Τα Νευρωνικά Δίκτυα ως εργαλείο υπολογισμού προβλημάτων Πολιτικού Μηχανικού	4
1.3 Σκοπός, Στάδια και Δομή Εργασίας.....	6
2 Θεωρητικό μέρος.....	9
2.1 Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα.....	9
2.1.1 Μελέτη Σύνθεσης Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (Mix Design) – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	9
2.1.2 Συστατικά Υλικά Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος και Κονιάματος.....	16
2.1.3 Εργαστηριακές Δοκιμές Αυτοσυμπυκνόμενου Σκυροδέματος και Κονιάματος	21
2.2 Ρεολογία Αυτοσυμπυκνόμενου Σκυροδέματος (rheology).....	25
2.2.1 Ρεολογία και κατηγορίες Ρευστών.....	25
2.2.2 Το νωπό Αυτοσυμπυκνόμενο Σκυρόδεμα ως ρευστό	29
2.2.3 Ειδικά Ρεολογικά Μοντέλα Αυτοσυμπυκνόμενου Σκυροδέματος και Κονιάματος ..	31
2.3 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.....	34
2.3.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και Βαθιά Μηχανική Μάθηση.....	34
2.3.2 Παράμετροι και Υπερπαραμέτροι Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	36
2.3.3 Βελτιστοποίηση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων με εφαρμογή στο πρόβλημα της Ταξινόμησης.....	39
3 Πειραματικό μέρος.....	45
3.1 Πειραματικά Δεδομένα	46
3.2 Πειραματικά δεδομένα από τη Διεθνή Βιβλιογραφία	50
3.3 Μοντελοποίηση.....	51
4 Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	55
4.1 Ακρίβεια Μοντέλου.....	55
4.2 Αξιολόγηση υπερπαραμέτρων ΤΝΔ.....	59
4.3 Επιλογή βέλτιστου μοντέλου ΤΝΔ.....	59
4.4 Αποκλίσεις - Ειδικές Περιπτώσεις	60
4.5 Εγκυρότητα Αποτελεσμάτων	62
5 Συμπεράσματα.....	65
Βιβλιογραφία Α	67
Βιβλιογραφία Β	71
Παράρτημα Α. Πειραματικά δεδομένα	75
Παράρτημα Β. Βιβλιογραφικά δεδομένα	79
Παράρτημα Γ. Βιβλιογραφικά δεδομένα που δεν αξιολογήθηκαν σύμφωνα με EFNARC	87

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Σύγκριση αναλογιών των συστατικών υλικών που διαμορφώνουν κάθε μίγμα ΑΣΣ (Self-Compacting Concrete) και ΣΣ (Conventional Concrete) αντίστοιχα. Ως W συμβολίζεται το νερό, ως Powder συμβολίζονται οι κονίες του μίγματος ΑΣΣ, δηλαδή το τσιμέντο και τα πρόσθετα, ενώ ως C συμβολίζεται το τσιμέντο στο ΣΣ, ως S η προστιθέμενη άμμος και ως G η ποσότητα των χονδρόκοκκων αδρανών. Το χημικό πρόσμικτο στην περίπτωση του ΑΣΣ είναι ο υπερρυστοποιητής. (Okamura & Ouchi, 2003).....	3
Εικόνα 2 Μελέτη Συνθέσεως κατά τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες. (Guidelines & Concrete, 2005).....	11
Εικόνα 3 Ημι-αυτοματοποιημένη μελέτη συνθέσεως αυτοσυμπυκνούμενου ελαφροσκυροδέματος μεταφρασμένη σε ένα διάγραμμα ροής, με:	12
Εικόνα 4 Διαγραμματική απεικόνιση της επιρροής κάθε συστατικής ουσίας ενός ΑΣΣ ή ΑΣΚ σε συνάρτηση με τις δύο βασικές ρεολογικές παραμέτρους της νωπής του φάσης, την τάση διαρροής και το ιξώδες..	21
Εικόνα 5 Εξοπλισμός δοκιμής Εξάπλωσης.	22
Εικόνα 6 Εξοπλισμός δοκιμής Χοάνης V.	23
Εικόνα 7 Εξοπλισμοί για τις δοκιμές μικρή δοκιμή εξάπλωσης και μικρή δοκιμή χοάνης V. (Okamura, 2003)	24
Εικόνα 8 Φαινόμενο ιξώδες συναρτήσεως του ρυθμού διάτμησης στα ψευδοπλαστικά ρευστά.	27
Εικόνα 9 Φαινόμενο ιξώδες συναρτήσεως του ρυθμού διάτμησης στα διασταλτικά ρευστά.....	28
Εικόνα 10 Ρεολογικό μοντέλο Bingham, πλαστικών ρευστών.....	29
Εικόνα 11 Σχέση μεταξύ ρευστότητας κονιάματος και αυτοσυμπυκνωσιμότητας νωπού σκυροδέματος... ..	32
Εικόνα 12 Νομογράφημα συσχέτισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών εξάπλωσης και χοάνης V, με τους συντελεστές συνεκτικότητας (α) και ροής (β) (Bouziani & Benmounah, 2013).	33
Εικόνα 13 Διάγραμμα κατά Venn, στο οποίο απεικονίζονται οι υποκατηγορίες της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Inteligence, AI). Σε κάθε περίπτωση, αναγράφεται ένα παράδειγμα αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για το σκοπό της κάθε κατηγορίας. Στην περίπτωση της Βαθιάς Μηχανικής Μάθησης ως παράδειγμα αναφέρονται τα MLPs – Multilayer Perceptrons, μία κατηγορία Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. (Goodfellow et al 2016).....	35
Εικόνα 14 Σχηματική απεικόνιση των βιολογικών νευρώνων.	36
Εικόνα 15 Σχηματική απεικόνιση των τεχνητών νευρώνων.	37
Εικόνα 16 Παράδειγμα μη γραμμικών διαχωρίσιμων δεδομένων. Αριστερά, παρουσιάζονται δεδομένα τα οποία απεικονίζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες και δεν είναι γραμμικά διαχωρίσιμα. Δεξιά, παρουσιάζονται τα ίδια δεδομένα αλλά μετασχηματισμένα σε πολικές συντεταγμένες. Πλέον, τα δεδομένα είναι γραμμικά διαχωρίσιμα. (Goodfellow, 2016)	38
Εικόνα 17 Σχηματική απεικόνιση ενός ΤΝΔ με πλήρως συνδεδεμένους νευρώνες (multilayer feed-forward neural network structure) και αριθμό κρυμμένων στρώσεων μεγαλύτερο από Κ. Οι νευρώνες που είναι τονισμένοι με κόκκινο χρώμα σκιαγραφούν την διαδικασία ενεργοποίησης του νευρώνα i του στρώματος Κ, με $a_i^{(k)}$ να συμβολίζεται διαφορετικά το τελικό αποτέλεσμα V. (Goodfellow, 2016)....	38
Εικόνα 18 Τυπική σύνθετη καμπύλη μεταξύ εμπειρικού σφάλματος και πλήθους εποχών-επαναλήψεων ενός αλγορίθμου ΤΝΔ. (Goodfellow, 2016).....	43
Εικόνα 19 Γραφική απεικόνιση των εννοιών της υπερπροσαρμογής και της υποπροσαρμογής του αλγορίθμου στη γεννήτρια κατανομή εισερχομένων δεδομένων. Στην πρώτη περίπτωση ο αλγόριθμος δεν έχει εκπαιδευτεί πλήρως και στην τελευταία, ο αλγόριθμος μπορεί να αναγνωρίσει μόνο τα δεδομένα εκπαίδευσης. (Goodfellow, 2016)	43
Εικόνα 20 Πειραματικός εξοπλισμός για τη σύνθεση νωπού κονιάματος.	47
Εικόνα 21 Πειραματικός εξοπλισμός για τις δοκιμές Μικρή δοκιμή εξάπλωσης και Μικρή δοκιμή χοάνης V.	47
Εικόνα 22 Εικόνες SEM για το πληρωτικό υλικό BPD, με μεγέθυνση από αριστερά προς τα δεξιά x100, x400 και x1200 αντίστοιχα.	48
Εικόνα 23 Πειραματική διαδικασία παρασκευής νωπού κονιάματος.....	49
Εικόνα 24 Εικόνες από την πειραματική διαδικασία της μικρής διάταξης δοκιμής εξάπλωσης.....	49
Εικόνα 25 (α) - (στ) Καμπύλες εμπειρικού σφάλματος σε συνάρτηση με το πλήθος εποχών-επαναλήψεων των αλγορίθμου ΤΝΔ των Μοντέλων 1 έως 6, αντίστοιχα (διαγράμματα Loss-epochs).	57
Εικόνα 26 (α) - (στ) Καμπύλες ακρίβειας ταξινόμησης σε συνάρτηση με το πλήθος εποχών-επαναλήψεων των αλγορίθμου ΤΝΔ των Μοντέλων 1 έως 6, αντίστοιχα.	58

Εικόνα 27 Διαγραμματική απεικόνιση του Μοντέλου 6, το οποίο αποτελεί ένα Πρόσθιας Τροφοδότησης Πολυεπίπεδο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (Multilayer Feed-Forward Neural Network Structure). Στην εικόνα φαίνονται οι παράμετροι εισαγωγής του δικτύου, γραμμένες με τους αγγλικούς τους όρους, το πλάτος και το βάθος του δικτύου, καθώς και το επίπεδο εξόδου. 60

Πίνακες

Πίνακας 1 Κατηγορίες προσθέτων, σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για ΑΣΣ. Στον Τύπο Ι, ανήκουν τα αδρανή και ημι-αδρανή πρόσθετα, στα οποία ανήκουν τα ορυκτολογικά πληρωτικά υλικά όπως είναι ο ασβεστόλιθος ή ο δολομίτης. Στον Τύπο ΙΙ, ανήκουν τα ποζολανικά πρόσθετα, στα οποία ανήκουν η ιπτάμενη τέφρα ή η πυριτική παιπάλη, καθώς και τα υδραυλικά πρόσθετα, στα οποία ανήκει η σκωρία υψικαμίνου.	17
Πίνακας 2 Κατηγορίες εξάπλωσης Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος.	22
Πίνακας 3 Κατηγορίες ιξώδους ΑΣΣ - Χοάνης V.	23
Πίνακας 4 Τυπική μορφή του Πίνακα Σύγκρισης ενός δυαδικού λογικού προβλήματος Ταξινόμησης.	44
Πίνακας 5 Υπερπαραμέτροι για καθένα από τα 6 μοντέλα που αναλύθηκαν.	56
Πίνακας 6 Αποτελέσματα για την ακρίβειά των μοντέλων 1-6 σε επίπεδο δεδομένων επικύρωσης και ελέγχου.	59

Ανάπτυξη Μοντέλου Πρόβλεψης Ρεολογικών Χαρακτηριστικών Αυτοσυμπυκνούμενου Κονιάματος με τη Μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Παπακωνσταντίνου Κ. Α. (Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Ε.)

Περίληψη

Τα Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ) και Αυτοσυμπυκνούμενο Κονίαμα (ΑΣΚ), αποτελούν ένα πολλά υποσχόμενο είδος δομικών υλικών, μιας και χαρακτηρίζονται από υψηλή ρευστότητα, μεγάλη ικανότητα πλήρωσης και διέλευσης σε συνδυασμό με αντίσταση έναντι διαχωρισμού. Οι ιδιότητες αυτές, συνυπάρχουν αρμονικά στο υλικό όταν αυτό βρίσκεται στη νωπή του κατάσταση, χαρακτηρίζοντας έτσι τη ρεολογική του συμπεριφορά ως εξαιρετική. Για να μπορέσουν όμως οι συγκεκριμένες ιδιότητες να σταθεροποιηθούν ώστε να δημιουργήσουν ένα εύρωστο μίγμα, απαιτείται η μελέτη σύνθεσης του υλικού να ακολουθεί αυστηρούς κανονισμούς, γεγονός που καθιστά απαιτητική την παρασκευή του. Η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης ρεολογικών χαρακτηριστικών ΑΣΚ, με βάση τις ιδιότητες των συστατικών του υλικών, φαίνεται ότι θα μπορούσε να επικουρήσει αν όχι να αντικαταστήσει, τη μελέτη σύνθεσης. Για την ανάπτυξη του μοντέλου, χρησιμοποιείται η Μέθοδος των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), μέθοδος η οποία είναι ιδανική για επίλυση μη γραμμικών, σύνθετων προβλημάτων. Προκειμένου να εφαρμοστεί, είναι απαραίτητο να διαμορφωθεί μία βάση δεδομένων που περιέχει ανεξάρτητες μεταξύ τους, επιτυχημένες και αποτυχημένες, συνθέσεις ΑΣΚ. Για τον σκοπό αυτόν, λαμβάνουν χώρα πειραματικές διαδικασίες παρασκευής ΑΣΚ, καθώς και βιβλιογραφική έρευνα εύρεσης αντίστοιχων συνθέσεων ΑΣΚ. Με τη συμπλήρωση της βάσης δεδομένων, ξεκινάει η διαδικασία εκπαίδευσης του αλγορίθμου, από την οποία προκύπτει το βέλτιστο δυνατό μοντέλο και μία σειρά αποτελεσμάτων που συσχετίζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός μίγματος ΑΣΚ με τα χαρακτηριστικά του μοντέλου ΤΝΔ. Για τα αποτελέσματα που εξετάστηκαν, η τελική ακρίβεια ελέγχου που χαρακτηρίζει το βέλτιστο μοντέλο ανέρχεται σε 85%, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την εφαρμογή δεύτερης, ανεξάρτητης από τη διαδικασία εκμάθησης, συλλογής δεδομένων ελέγχου που περιέχεται στη βάση δεδομένων. Από την άλλη, μίγματα τα οποία περιέχουν μικρή έως μηδενική ποσότητα πρόσθετου υλικού, καθώς και μίγματα που περιέχουν συγκριτικά μεγάλες ποσότητες τσιμέντου, φαίνεται να έχουν ασταθή ρεολογικά χαρακτηριστικά αυτοσυμπυκνοσιμότητας, γεγονός που καθιστά τον αλγόριθμο ανίκανο να τα κατατάξει με ακρίβεια στα ΑΣΚ. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω του μικρού πλήθους των συλλεγμένων δεδομένων της βάσης, τα αποτελέσματα του μοντέλου πρόβλεψης θεωρούνται οριακά αξιόπιστα. Το γεγονός αυτό επιτάσσει τη διερεύνηση της προσαρμοστικότητας του μοντέλου πρόβλεψης σε περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα, προκειμένου να διευκρινιστεί η αξιοπιστία του.

Λέξεις Κλειδιά: αυτοσυμπυκνούμενο κονίαμα, μελέτη σύνθεσης, ρεολογία, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, μηχανική μάθηση

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CHEMICAL ENGINEERING
IIPP “MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY”

MSc DIPLOMA THESIS
ΣΧΜ ΜΔΕ 2021/06

Development of a prediction model of Self-Compacting Mortar’s rheological characteristics using Artificial Neural Network

Papakonstantinou K. A. (supervised by Badogiannis E.)

Abstract

Self-Compacting Concrete (SCC) and Self-Compacting Mortar (SCM) are rising mixtures in the construction industry taking advantage of their excellent resistance to segregation, i.e. high mixture consistency, flowability and filling ability. These properties coexist harmoniously in the material at its fresh state, thus characterizing its rheological behavior as excellent. In order to stabilize these opposite properties, so that the final mixture is robust, mix design methods of self-compacting mixtures follows strict regulations, which makes their preparation demanding. A prediction model that could solve the complex problem of characterizing a composition of materials with known properties as suitable or not to be a robust and stable self-consolidating mixture, could be able to replace mix design methods. The prediction model for SCM is created using Artificial Neural Network (ANN) techniques, a useful machine learning tool, appropriate for solving complex nonlinear problems. In order to be implemented, it is necessary to configure a database that contains independent, successful and failed, SCM compositions. A number of bibliographic and experimental input data are collected. By filling the database, algorithm’s training process begins and the most accurate model, as well as the translation of ANN model’s features into physical features of a SCM, result. For the results examined, the final test accuracy of the optimized model, accounts approximately 85%, which is confirmed by the implementation of a second data set contained in the database that is independent of the learning process. Also, mixtures containing small to zero amount of mineral additives, as well as mixtures containing relatively large amounts of cement, appear to have unstable rheological self-compacting characteristics, which makes the algorithm unable to predict them accurately. Finally, it should be noted that due to the fact that input data has a relatively small size, these results are marginally trusted. This necessitates the investigation of the adaptability of the prediction model to more experimental results, in order to clarify its reliability.

Keywords: self-compacting mortar, mix design, rheology, artificial neural networks, machine learning

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, όπως και κάθε άλλο είδος επιστημονικής εργασίας, είναι προϊόν καθοδήγησης, βοήθειας αλλά και υποστήριξης μιας ομάδας ατόμων. Θα ήταν μεγάλη παράληψή μου, λοιπόν, να μην ευχαριστήσω έναν προς έναν τους ανθρώπους που συντέλεσαν στην ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Ευστράτιο Γ. Μπαδογιάννη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα. Χάρη σε αυτό, είχα την τύχη να έρθω σε επαφή με ένα καινούργιο, για εμένα, επιστημονικό πεδίο, τη Μηχανική Μάθηση. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά και για την εξαιρετική συνεργασία μας που ακολούθησε μετά την ανάθεση του θέματος. Η ευγένειά του καθώς και η όρεξή του για προσφορά γνώσεων και ιδεών, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην πορεία της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ανδρέα Κουνάδη, ο οποίος με τις υψηλές γνώσεις του γύρω από το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, με βοήθησε σημαντικά ώστε να καταλάβω πλήρως το πρόβλημα που η συγκεκριμένη εργασία καλείται να επιλύσει. Η καθοδήγησή του καθώς και η όρεξή του για δουλειά ήταν καταλυτικής φύσεως.

Ένα ακόμη μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους υποψήφιους διδάκτορες της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής ΕΜΠ, Βασίλη Τσιρώνη και Αθηνά Ψάλτα, οι οποίοι με μύησαν στην φιλοσοφία της Μηχανικής Μάθησης και των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, παρέχοντάς μου τις απαραίτητες γνώσεις και τα κατάλληλα εργαλεία ώστε να καταλάβω σε βάθος τις νέες αυτές έννοιες. Χωρίς τις συμβουλές τους, η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα είχε τη μορφή που έχει σήμερα.

Το τελευταίο μεγάλο ευχαριστώ, το οφείλω φυσικά και σε ολόκληρη την οικογένειά μου και στους πολύ καλούς μου φίλους, οι οποίοι για μία ακόμη φορά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στάθηκαν άρρηκτοι βράχοι στο πλάι μου.

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά περί Σκυροδέματος

Το 1985, στη νότια Γαλιλαία του Ισραήλ, ανακαλύφθηκε μία κατασκευή η οποία αποτελείται από ένα μίγμα ασβεστίτη με πέτρες. Χρονολογείται ότι δημιουργήθηκε το 7,000 π.Χ. και αποτελεί τη αρχαιότερη γνωστή, έως και σήμερα, κατασκευή από *σκυρόδεμα*. Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι, το 3,000 π.Χ. χρησιμοποιούσαν ως πρώτη ύλη κονιάματα με γύψο αλλά και κονιάματα με ασβεστόλιθο, ενώ κάποια χρόνια αργότερα, το 800 π.Χ., οι αρχαίοι Έλληνες δημιουργούσαν διάφορα κτίσματα από λάσπη υψηλών αντοχών. Η πρώτη άνθιση που αντίκρισε το σκυρόδεμα στην ιστορία του, έφτασε την περίοδο 300-476 π.Χ. στη Ρώμη, όπου οι αρχαίοι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν ποζολάνες από την περιοχή του Βεζούβιου προκειμένου να χτίσουν ορισμένα από τα σημαντικότερα μνημεία της πόλης, όπως είναι το Κολοσσαίο και το Πάνθεο. Έκτοτε, η χρήση του συγκεκριμένου υλικού περιορίστηκε, έως που το 1824, ο Άγγλος Joseph Aspdin ανακάλυψε το τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ, το πιο βασικό συστατικό του σκυροδέματος όπως είναι ευρέως διαδεδομένο σήμερα. Η δεύτερη περίοδος της άνθισής του ξεκίνησε, με την πρώτη γέφυρα κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από σκυρόδεμα, να ανεγείρεται το 1889, τον πρώτο δρόμο το 1891 στη Γερμανία και τον πρώτο ουρανοξύστη από σκυρόδεμα στο Οχάιο των ΗΠΑ το 1903. Στην Ελλάδα, η πρώτη δημοσίευση η οποία αποτελούσε μετάφραση του Γερμανικού κανονισμού DIN 1045 έλαβε χώρα το 1945, ενώ το 1954 εκδόθηκε ο πρώτος Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος¹.

Σήμερα, το *σκυρόδεμα* είναι το υλικό που παρουσιάζει την ευρύτερη χρήση από όλα τα υλικά, όχι μόνο δομικά, τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, αμέσως μετά από το νερό. Η παγκόσμια κατανάλωσή του ξεπερνά τους 10 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως και ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ο εξαιρετικά ευνοϊκός συνδυασμός των ιδιοτήτων και του κόστους του. Συμπεριφέρεται εξαιρετικά στο νερό, έχει πολύ μεγάλη και διαρκή *ανθεκτικότητα* στις περιβαλλοντικές επιδράσεις, μπορεί να πάρει *σχήμα* από μία τεράστια ποικιλία διευκολύνοντας έτσι την κατασκευή δομημάτων με ιδιαίτερη αρχιτεκτονική. Γενικά το *κόστος* και η *ενέργεια παρασκευής* του είναι χαμηλή, ενώ η *διαθεσιμότητα* των *συστατικών* του είναι μεγάλη. Επιπλέον, κατά την σκλήρυνσή του, χαρακτηρίζεται από *μεγάλη θλιπτική αντοχή* και *έχει μεγάλη αντοχή έναντι πυρκαγιάς* (Nasr et al, 2019), (Τριανταφύλλου, 2013). Πώς ορίζεται όμως φυσικά και χημικά το σκυρόδεμα;

Μία μακροσκοπική εξέταση του υλικού δείχνει ότι το σκυρόδεμα αποτελείται κατά βάση από *αδρανή* (άμμο, χαλίκι, σκύρα) διαφόρων σχημάτων και μεγεθών, τα οποία είναι μεταξύ τους συγκολλημένα με τη βοήθεια του *ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού*, του προϊόντος δηλαδή, της αντίδρασης του νερού με το τσιμέντο. Η συγκεκριμένη αντίδραση ονομάζεται *αντίδραση ενυδάτωσης* και λαμβάνει χώρα καθώς το τσιμέντο ως υδραυλικό υλικό αντιδρά με το νερό, παράγοντας χημικές ενώσεις οι οποίες σε συνεργασία με τα αδρανή, δίνουν όλες αυτές τις ιδιότητες στο συγκεκριμένο υλικό. Το τσιμέντο παρασκευάζεται με την άλεση κλίνκερ, μαζί με μικρή ποσότητα προσθέτων (π.χ. γύψος, θηραϊκή γη, ιπτάμενη τέφρα, κλπ). Το κλίνκερ είναι το συστατικό που προσδίδει τις βασικές υδραυλικές ιδιότητες στο τσιμέντο, καθώς αποτελείται από 40-80% πυριτικό τριασβέστιο (C₃S), 0-30% πυριτικό διασβέστιο

¹ Βιβλιογραφική πηγή:
<http://www.interbeton.gr/default.asp?pageid=38&langid=1>

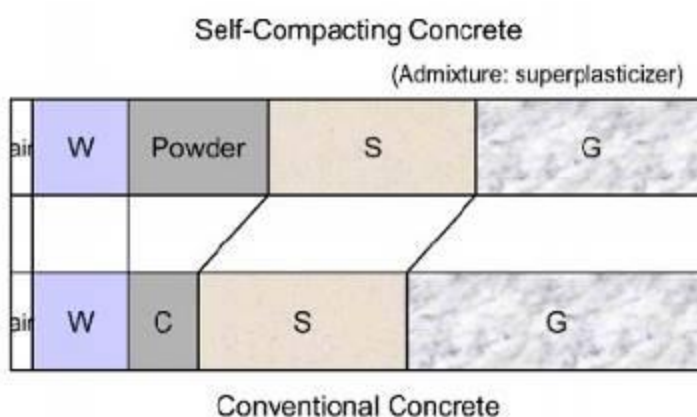
(C₂S), 7-15% αργιλικό τριασβέστιο (C₃A) και 4-15% αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο (C₄AF). Με μία πιο αναλυτική χημική περιγραφή, η αντίδραση ενυδάτωσης ξεκινάει μερικά μόλις λεπτά μετά την ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό, όταν κάνουν την εμφάνισή τους οι βελονοειδείς κρύσταλλοι του *ένυδρου θειοαργιλικού ασβεστίου*, γνωστοί και ως κρύσταλλοι *ετρινγκίτη*. Μερικές ώρες αργότερα, σχηματίζονται οι μεγάλοι πρισματικοί κρύσταλλοι *υδροξειδίου του ασβεστίου*, ενώ οι πολύ μικροί κρύσταλλοι ινώδους μορφής των *ένυδρων του πυριτικού ασβεστίου* αρχίζουν να γεμίζουν τον κενό χώρο που καλυπτόταν από νερό και κόκκους τσιμέντου. Μερικές ημέρες αργότερα, οι κρύσταλλοι ετρινγκίτη είναι πιθανό να διασπαστούν, σχηματίζοντας *θειικά ένυδρα εξαγωνικής πλακοειδούς μορφής*. Η ίδια πλακοειδής μορφή είναι χαρακτηριστική και των ένυδρων του αργιλικού ασβεστίου, τα οποία σχηματίζονται σε τσιμεντοπολτούς που προήλθαν από την ενυδάτωσή του (Τριανταφύλλου, 2013).

Όπως είναι κατανοητό, ο νωπός τσιμεντοπολτός περιλαμβάνει διάφορες φάσεις υλικών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ανομοιόμορφη κατανομή, μέγεθος και σχήμα. Αυτή η ανομοιογένεια επηρεάζει σημαντικά την αντοχή και άλλες μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος (Τριανταφύλλου, 2013). Για το σκοπό αυτό, είναι σημαντικό να αναλυθούν τα φυσικά χαρακτηριστικά της νωπής φάσης του σκυροδέματος. Το *ρευστό-νωπό σκυρόδεμα*, όπως όλα τα τσιμεντοειδή υλικά, αποτελεί μία *συγκεντρωμένη-συσσωρευμένη διασωματειακή διασπορά* με μεγάλο εύρος διαμέτρων των περιεχόμενων σωματιδίων (από 10⁻⁷ έως 8 mm για το χρησιμοποιούμενο σκυρόδεμα). Τα σωματίδια επηρεάζονται από μία πολύπλοκη ισορροπία μεταξύ των διασωματειακών δυνάμεων (interparticle forces), δημιουργώντας μία *πλαστικο-ιξοειδή συμπεριφορά εξαρτώμενη από το χρόνο*. Η συμπεριφορά αυτή, δεν υπακούει στη θεωρία των Νευτώνειων υγρών. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι οι τριβές μεταξύ των σωματιδίων, οι δυνάμεις Van der Waals, οι κολλοειδείς δυνάμεις, οι δυνάμεις συσσωμάτωσης και οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Όλες αυτές, εξαρτώνται από τη φύση, την υφή, το σχήμα, την επιφανειακή δράση, από τη σύσταση και τη χημική συμπεριφορά των σωματιδίων αλλά και από την περιεκτικότητα του νερού. Το σκυρόδεμα παρουσιάζει αμετάκλητες ιδιότητες συναρτήσει του χρόνου ως αποτέλεσμα των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο τσιμενολίθωμα, όπως αναλύθηκε προηγουμένως (Αναγνωστόπουλος, 2009).

Πέρα από όλα τα θετικά που χαρακτηρίζουν το σκυρόδεμα σαν υλικό, υπάρχουν και ορισμένα αρνητικά του χαρακτηριστικά, τα οποία απαγορεύουν τη χρήση του συγκεκριμένου υλικού για κάποιες περιπτώσεις κατασκευών. Ένα παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση κατασκευής από σκυρόδεμα, με αρκετά λεπτομερές σχήμα ή με μεγάλη πυκνότητα οπλισμών. Η χρήση του κοινού σκυροδέματος τότε, διαγράφει ορισμένες από τις λεπτομέρειες της κατασκευής, καθώς το νωπό του μίγμα δεν συνδυάζει τη ρεολογία, και συγκεκριμένα τη μείωση του ορίου διαρροής, με τη διατήρηση ή την αύξηση του ιξώδους του (Αναγνωστόπουλος, 2009), ώστε να είναι σε θέση να πληρώσει κάθε διαθέσιμο κενό του ξυλοτύπου, δίχως να λάβουν χώρα φαινόμενα απόμιξης. Το 1986 στην Ιαπωνία, ο *Okamura* εξέφρασε την ανάγκη ανάπτυξης ενός υλικού που περιγράφεται από τις συγκεκριμένες ιδιότητες, και λίγο αργότερα, το 1988, ολοκληρώθηκε το πρότυπο παρασκευής του. Το υλικό αυτό αποτελεί έως σήμερα ένα νέο είδος σκυροδέματος και ονομάζεται *Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (ΑΣΣ)* (Okamura & Ouchi, 2003).

Το ΑΣΚ είναι ένα είδος σκυροδέματος που έχει μεγάλη ρευστότητα, και διαστρώνεται-συμπυκνώνεται με ελάχιστο ή καθόλου κόπο, ενώ παρασκευάζεται προσθέτοντας, σε μίγμα σκυροδέματος, *υπερρευστοποιητή* και διάφορα *ορυκτά πρόσθετα* (όπως η πυριτική παιπάλη, η σκωρία υψικαμίνου, η ιπτάμενη τέφρα κοκ), αντικαθιστώντας παράλληλα κάποιο ποσοστό των χονδρών αδρανών με *άμμο* (Τριανταφύλλου, 2013). Τα βασικά χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν *αντοχή έναντι διαχωρισμού υλικών-συνοχή μίγματος*,

καλή ρευστότητα και καλή διαπεραστική ικανότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά, προσφέρουν στο υλικό ομοιογένεια, μικρό πορώδες, μικρή διαπερατότητα, καλή μικροδομή, ομοιόμορφη και καθολική αντοχή, κι επομένως υψηλή ανθεκτικότητα στην κατασκευή που χρησιμοποιείται, όπως και καλό φινίρισμα. Επιπροσθέτως, αναπτύσσει υψηλές πρώιμες αντοχές, λιγότερο χρόνο σκλήρυνσης κι άρα το ξεκαλούπωμα της κατασκευής γίνεται πιο γρήγορα. Λόγω όμως της ποσότητας του υπερρευστοποιητή και του τσιμέντου που απαιτείται για την επιτυχημένη σύνθεση ενός ΑΣΚ, το κόστος του είναι αυξημένο συγκριτικά με το κόστος του συμβατικού σκυροδέματος (ΣΣ). Το συγκεκριμένο πρόβλημα λύνεται με την αντικατάσταση του τσιμέντου από ειδικά πρόσθετα υλικά, τα οποία βελτιώνουν τη ρεολογία του νωπού ΑΣΣ, και άρα μειώνουν εκτός από την ποσότητα του τσιμέντου, και την ποσότητα του χημικού πρόσμικτου. (Benli, Karatas, & Anil, 2020; Boukhelkhal et al, 2017; Guidelines & Concrete, 2005; Nasr et al, 2019)



Εικόνα 1 Σύγκριση αναλογιών των συστατικών υλικών που διαμορφώνουν κάθε μίγμα ΑΣΣ (Self-Compacting Concrete) και ΣΣ (Conventional Concrete) αντίστοιχα. Ως W συμβολίζεται το νερό, ως Powder συμβολίζονται οι κόνιες του μίγματος ΑΣΣ, δηλαδή το τσιμέντο και τα πρόσθετα, ενώ ως C συμβολίζεται το τσιμέντο στο ΣΣ, ως S η προστιθέμενη άμμος και ως G η ποσότητα των χονδρόκοκκων αδρανών. Το χημικό πρόσμικτο στην περίπτωση του ΑΣΣ είναι ο υπερρευστοποιητής. (Okamura & Ouchi, 2003)

Μία σύγκριση μεταξύ των ΑΣΣ και ΣΣ λαμβάνει χώρα στη συνέχεια, ώστε να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Τα ΑΣΣ έχουν ελαφρώς μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από τα αντίστοιχα κοινά (όταν δηλαδή έχουν παρόμοιο λόγο νερού προς τσιμέντο) λόγω της έλλειψης δόνησης που προκαλεί καλύτερη διεπιφάνεια μεταξύ πάστας και αδρανών. Η *εφελκυστική αντοχή* θεωρείται ίδια με αυτή του αντίστοιχου κοινού σκυροδέματος, καθώς ο διαφορετικός όγκος της πάστας δεν παίζει ρόλο σε αυτό το μέγεθος. Το *μέτρο ελαστικότητας* είναι μικρότερο από του ΣΣ μιας και εξαρτάται άμεσα από το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών, τα οποία σε αυτήν την περίπτωση είναι λιγότερα σε αριθμό καθώς κυριαρχεί η νωπή φάση του υλικού (αλλιώς πάστα, η οποία αποτελείται από νερό τσιμέντο και πρόσθετα-πληρωτικά υλικά). Ο *ερπυσμός* είναι πιο έντονος στο ΑΣΣ, καθώς περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό πάστας, στο πορώδες της οποίας λαμβάνει χώρα το φαινόμενο, και λιγότερο ποσοστό αδρανών. Η *χημική ξήρανση* και η *συστολή ξήρανσης* είναι αυξημένες λόγω του χαμηλού λόγου νερού προς τσιμέντο που χαρακτηρίζει τα ΑΣΣ, μιας και περιέχουν περισσότερη ποσότητα τσιμέντου και λιγότερη ποσότητα νερού, ενώ τα αδρανή είναι μειωμένα. Η *συνάφεια* μεταξύ οπλισμών είναι καλύτερη, λόγω του ότι δημιουργείται ο μηνίσκος νερού κάτω από τους ανώτερους οπλισμούς, γεγονός βέβαια που δεν αναιρεί την ισχύ των κανονισμών περί αγκυρώσεων. Λόγω του *καλού φινιρίσματος*, το

ΑΣΣ χωρίς κάποια κατεργασία της σκληρυμένης επιφάνειας έχει έως και μηδενική διατμητική αντοχή στους αρμούς σκυροδέτησης σε αντίθεση με το ΣΣ, του οποίου το φινίρισμα δεν είναι εξίσου καλό. Τέλος, η *αντοχή έναντι πυρκαγιάς* είναι ίδια με αυτή του αντίστοιχου κοινού σκυροδέματος, και αναφορικά με την ανθεκτικότητα, το ΑΣΣ χαρακτηρίζεται ως περισσότερο ανθεκτικό από το ΣΣ, μιας και πληρώνει καλύτερα τον ξυλότυπο κι έχει καλύτερο φινίρισμα. (Guidelines & Concrete, 2005)

Είναι σημαντικό να επισημανθεί, στο σημείο αυτό, ότι προκειμένου ένα ΑΣΣ να διατηρεί όλα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά του, πρέπει η παρασκευή του να ακολουθεί συγκεκριμένους κανονισμούς και οδηγίες. Οποιαδήποτε ιδιότητά του μπορεί να μεταβληθεί σε μεγάλο βαθμό με μικρές αλλαγές στη ποσότητα ελεύθερου νερού στο μίγμα, για παράδειγμα, ή με αλλαγή της πηγής από την οποία ελήφθησαν τα συστατικά υλικά ή με το διαφορετικό περιεχόμενο του ρευστοποιητή (Angélica Lozano-Lunar et al, 2019b). Η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 2 που ακολουθεί.

1.2 Τα Νευρωνικά Δίκτυα ως εργαλείο υπολογισμού προβλημάτων Πολιτικού Μηχανικού

Το 1936, ο πατέρας της επιστήμης των υπολογιστών, *Alan Turing*, δημοσίευσε σε άρθρο του με τίτλο: «*On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungs problem*», τις βασικές αρχές σύμφωνα με τις οποίες λειτουργεί ένα σύγχρονο σύστημα υπολογιστή, όπως ακριβώς είναι γνωστό έως και τη σημερινή εποχή². Η συγκεκριμένη ανακάλυψη, μέσα σε λίγα χρόνια έχει εξελιχθεί με ραγδαίους ρυθμούς, και πλέον οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, όχι μόνο χρησιμοποιούνται ως υπολογιστικά εργαλεία για τις ανάγκες μίας σειράς από επαγγέλματα, αλλά μπορούν ακόμα και να μιμούνται στοιχεία της ανθρώπινης συμπεριφοράς τα οποία υπονοούν έστω και μία στοιχειώδη ευφυΐα. Η τελευταία εφαρμογή, αναφέρεται στον όρο της Τεχνητής Νοημοσύνης, ενός κλάδου της Πληροφορικής που ως στόχο έχει τη σύνθεση ευφυούς συμπεριφοράς, με στοιχεία συλλογιστικής, μάθησης και προσαρμογής στο περιβάλλον.

Ένας Μηχανικός, προκειμένου να επιλύσει και να βελτιστοποιήσει τα διάφορα προβλήματα Μηχανικής που τον απασχολούν, έχει ανάγκη της χρήσης των πιο σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων, ώστε να φέρει εις πέρας το σκοπό του σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο, και με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια υπολογισμού. Τα τελευταία χρόνια, η *Μηχανική Μάθηση*, η οποία αποτελεί ένα παρακλάδι της Τεχνητής Νοημοσύνης, βρίσκει εφαρμογή στην επίλυση ολοένα και περισσότερων δυσεπίλυτων προβλημάτων της συγκεκριμένης κατηγορίας, τα οποία συνήθως αποτελούν πολυπαραμετρικά ή μη γραμμικά προβλήματα Μηχανικής. Η πιο γνωστή μεθοδολογία επίλυσής τους, που αποτελεί ένα μέρος της Μηχανικής Μάθησης, είναι η *Μέθοδος των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων*, κατά την οποία η επίλυση κάποιου υπολογιστικού προβλήματος λαμβάνει χώρα με τα *πρότυπα λειτουργίας των βιολογικών νευρώνων*. (για λεπτομερή ανάλυση της συγκεκριμένης μεθόδου, βλ. Ενότητα 2.3)

Ο *Πολιτικός Μηχανικός* χρησιμοποιεί τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) σε περιστάσεις όπως: ανίχνευση φθοράς ή καταστροφής κάποιας κατασκευής, προσδιορισμός του δομικού συστήματος, προσομοίωση της συμπεριφοράς των υλικών, έλεγχος του υπεδάφιου νερού, βελτιστοποίηση της κατασκευής, δημιουργία μοντέλου για τη σύνθεση σκυροδέματος για υποθαλάσσιες κατασκευές, πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος λόγω μακράς προσβολής του από θειικά άλατα, αξιολόγηση της διάχυσης

² Βιβλιογραφική πηγή:
https://en.wikipedia.org/wiki/Computer#cite_note-41

στη μάζα του σκυροδέματος χλωριόντων, προσδιορισμός της διαπερατότητας της ασφάλτου, κα (Abu Yaman et al, 2017). Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία των ΤΝΔ χρησιμοποιείται με σκοπό την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υλικών, και συγκεκριμένα του ΑΣΣ. Τέτοιου είδους προσομοιώσεις έχουν λάβει χώρα με επιτυχία από διάφορους ερευνητές τα τελευταία χρόνια, και σκοπό έχουν άλλοτε την προσομοίωση της αντοχής του ΑΣΣ, και άλλοτε την προσομοίωση της ρεολογικής του συμπεριφοράς. Μία λίστα που περιλαμβάνει από την πρώτη μελέτη ΑΣΣ με χρήση ΤΝΔ έως και τις πιο σύγχρονες εφαρμογές ΤΝΔ σε ΑΣΣ, ακολουθεί:

1. Το 2001, οι M. Nehdi et al παρουσίασαν την πρώτη τους προσπάθεια πρόβλεψης, με χρήση ΤΝΔ, των ρεολογικών και μηχανικών ιδιοτήτων μιγμάτων ΑΣΣ, έχοντας ως βάση την αναλογία των συστατικών στα συγκεκριμένα μίγματα.
2. Το 2010, οι Uysal et al εφάρμοσαν τη μέθοδο ΤΝΔ προκειμένου να προβλέψουν τη θλιπτική αντοχή μιγμάτων ΑΣΣ, χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους τα χαρακτηριστικά των ορυκτολογικών προσθέτων, τσιμέντου και των χημικών προσμίκτων, τα χαρακτηριστικά των αδρανών, καθώς και τις ποσότητές τους και την υδαταπορροφητικότητά τους.
3. Οι Siddique et al την ίδια χρονιά, προέβλεψαν επίσης τη θλιπτική αντοχή του ΑΣΣ, το οποίο περιείχε τέφρα (bottom ash), στις 7, 28, 90 και 365 ημέρες, χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους τα χαρακτηριστικά των συστατικών του μίγματος, αλλά και το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου από την τέφρα.
4. Τον επόμενο χρόνο (2011), οι Uysal et al, χρησιμοποίησαν τα ΤΝΔ προκειμένου να εκτιμήσουν την θλιπτική αντοχή ΑΣΣ, το οποίο περιέχει ορυκτολογικά πρόσθετα και ίνες πολυπροπυλενίου (PP), όταν εκτίθεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Οι παράμετροι εισόδου στον αλγόριθμο ήταν η ποσότητα τσιμέντου, των ορυκτολογικών προσθέτων, των αδρανών, ο βαθμός θέρμανσης του υλικού και η ύπαρξη των συγκεκριμένων ινών στη μάζα του.
5. Το 2015, οι Mashhadban et al ανέπτυξαν 4 διαφορετικά μοντέλα ΤΝΔ που προβλέπουν την εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη (splitting tensile strength), την ενέργεια θραύσεως (fracture energy), την αντοχή έναντι κάμψης (flexural strength) και τη θλιπτική αντοχή (compressive strength) ινοπλισμένου ΑΣΣ.
6. Το 2018, οι Nasr et al προέβλεψαν την θλιπτική αντοχή και την αντοχή έναντι κάμψεως, την υδαταπορροφητικότητα και την ηλεκτρική αντίσταση αυτοσυμπυκνούμενων κονιαμάτων (ΑΣΚ), μέσω μοντέλου ΤΝΔ, το οποίο ως παραμέτρους είχε τα περιεχόμενα υλικά (τσιμέντο, φυσικό ζεόλιθο, μικροπυριτία), την ηλικία των δοκιμίων αλλά και τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών δοκιμής εξάπλωσης και δοκιμής χοάνης V (βλ. Ενότητα 2.1.3).
7. Οι Onyari et al την ίδια χρονιά, χρησιμοποίησαν τα ΤΝΔ προκειμένου να προβλέψουν τη θλιπτική αντοχή και την αντοχή έναντι κάμψης κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με χρήση τροποποιημένου ζεόλιθου ως πρόσθετο υλικό. Οι εισερχόμενες παράμετροι ήταν 6 στον αριθμό και περιλάμβαναν τις ποσότητες τσιμέντου, πυριτικής άμμου, τροποποιημένου ζεόλιθου, νερού, τον χρόνο ωρίμανσης των δοκιμίων και το μέγεθος των επιβαλλόμενων φορτίων.
8. Οι Ramkumar et al το 2020, προέβλεψαν τη βέλτιστη σύσταση ενός ΑΣΣ αποτελούμενο από γεωργικά υλικά και βιομηχανικά απορρίμματα, χρησιμοποιώντας ΤΝΔ που βασίστηκαν στη μελέτη συνθέσεως του συγκεκριμένου ΑΣΣ.

9. Την ίδια χρονιά (2020), οι Konegu et al προέβλεψαν μηχανικές ιδιότητες ΑΣΣ, με έμφαση στις μεταβλητές εισόδου της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος καθώς και στα περιεχόμενα ορυκτά πρόσθετα και χημικά πρόσμικτα.
10. Το 2020 επίσης, οι Zhou et al μοντελοποίησαν την απόλυτη αντοχή του δεσμού συνάφειας μεταξύ των ινών και της μάζας του ινοπλισμένου, με οπτική ίνα πολυμερούς (FRP), ΑΣΣ, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της αντοχής σε θλίψη, του πλάτους σκυροδέματος, του μέτρου ελαστικότητας FRP, του πάχους FRP, του πλάτους FRP και του μήκους του δεσμού FRP.

Αναλυτικά, ο σκοπός της παρούσας εργασίας περιγράφεται στη συνέχεια.

1.3 Σκοπός, Στάδια και Δομή Εργασίας

Μία πρώτη σκέψη από την πρώτη Ενότητα της εισαγωγής, 1.1, αποτελεί το γεγονός ότι οι ρεολογικές ιδιότητες ενός μίγματος ΑΣΣ ή ΑΣΚ, είναι εκείνες οι οποίες το καθιστούν αυτοσυμπυκνούμενο. Ο χαρακτηρισμός επομένως ενός μίγματος σκυροδέματος ή κονιάματος, ως ΑΣΣ ή ΑΣΚ, είναι ζωτικής σημασίας να προέρχεται ως συμπέρασμα από τον τρόπο με τον οποίο το υλικό αυτό, στη νωπή του φάση ρέει. Από την δεύτερη Ενότητα της εισαγωγής, 1.2, η σκέψη που προκύπτει είναι ότι ένα πρόβλημα σαν τον χαρακτηρισμό των συγκεκριμένων υδραυλικών μιγμάτων, θα μπορούσε να επιλυθεί με χρήση της μεθόδου των ΤΝΔ. Με γνώμονα τις σκέψεις αυτές, δημιουργήθηκε η ιδέα για την εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Σκοπός της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής εργασίας που περιγράφεται στις ακόλουθες γραμμές, αποτελεί κατά βάση η διαμόρφωση του βέλτιστου μοντέλου ΤΝΔ, το οποίο θα έχει την δυνατότητα, σύμφωνα με τα ποσοτικά και φυσικά χαρακτηριστικά των συστατικών ενός υποψήφιου μίγματος ΑΣΚ, να προβλέψει εάν αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΑΣΚ. Η πρόβλεψη αυτή γίνεται με το πέρας της εκμάθησης του αλγορίθμου, η οποία λαμβάνει χώρα με άξονα την αξιολόγηση της ρεολογικής συμπεριφοράς των μιγμάτων, έπειτα από τη διεξαγωγή ρεολογικών πειραμάτων. Μέσω της όλης διαδικασίας, σκοπός είναι να εξαχθούν και ποιοτικές σχέσεις σε επίπεδο υλικού, σύμφωνα με τις οποίες θα γίνεται πιο κατανοητή η επιρροή ενός συστατικού υλικού του μίγματος, στην ευαισθησία του αλγορίθμου να προβλέψει σωστά την αυτοσυμπυκνωσιμότητά του.

Τα Στάδια της εργασίας, ξεκινούν να λαμβάνουν χώρα αρχικά με τη συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων συνθέσεων υποψήφιων μιγμάτων ΑΣΚ, είτε μέσω πειραματικών δοκιμών είτε μέσω βιβλιογραφικής έρευνας. Έπειτα, καταστρώνεται ο κώδικας ο οποίος θα δημιουργήσει το βέλτιστο μοντέλο ΤΝΔ. Τέλος, τα αποτελέσματα από την μοντελοποίηση αυτή των δεδομένων, εξάγουν συμπεράσματα που αφορούν τόσο την πορεία διαμόρφωσης του αλγορίθμου ΤΝΔ, όσο και την επιρροή των συστατικών υλικών στην πορεία αυτή.

Η Δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιγράφεται συνοπτικά στην λίστα που ακολουθεί:

1. Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται ανάλυση των θεωρητικών αρχών που κρύβονται πίσω από τη μελέτη σύνθεσης ΑΣΣ, τη ρεολογία του ΑΣΚ καθώς επίσης και από τη θεωρία η οποία ορίζει έναν αλγόριθμο ΤΝΔ. Στην Ενότητα της Μελέτης Σύνθεσης ΑΣΣ, περιλαμβάνονται αναλυτικά τα στάδια αυτής για κάθε σύνθεση που αναλύεται, περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες σύμφωνα με τις οποίες αξιολογούνται τα μίγματα με το πέρας της σύνθεσής τους και αναλύονται οι αρχές σύμφωνα με τις οποίες μία μελέτη σύνθεσης εκπονείται. Επιπλέον, γίνεται αναφορά και στις ιδιότητες του κάθε συστατικού υλικού χωριστά. Στην Ενότητα της ρεολογίας, παρατίθεται η γενική θεωρία περί Μη Νευτώνειων ρευστών και κατατάσσεται το νωπό ΑΣΣ στην κατηγορία που ανήκει. Επιπλέον,

γίνεται μία ενδεικτική αναφορά στα σύνθετα ρεολογικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για το ΑΣΣ στο παρελθόν. Στην Ενότητα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, αναλύονται όλοι οι όροι που κρύβονται πίσω από την κατάσταση ενός τέτοιου είδους μοντέλου

2. Στο *Κεφάλαιο 3*, περιγράφεται η διαδικασία κατά την οποία συμπληρώθηκε η βάση δεδομένων της παρούσας εργασίας. Αρχικά περιγράφεται η πειραματική διαδικασία κατά την οποία παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ορισμένες συνθέσεις ΑΣΣ, και στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία συλλογής δεδομένων συνθέσεων από τη βιβλιογραφία. Στο τέλος του κεφαλαίου, περιγράφεται και η διαδικασία κατάστρωση της μοντελοποίησης με ΤΝΔ.
3. Στο *Κεφάλαιο 4*, παρατίθενται αποτελέσματα που προέκυψαν με το πέρας της βελτιστοποίησης του αλγορίθμου ΤΝΔ. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν την ακρίβεια του τελικού μοντέλου, και ορισμένες πιο ειδικές περιπτώσεις, όπως ο επανέλεγχος του μοντέλου με διαφορετικό είδος εισερχομένων δεδομένων και η σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων των υλικών και της ευαισθησίας του αλγορίθμου
4. Τέλος, στο *Κεφάλαιο 5*, περιγράφονται αναλυτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου.

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου
ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»

2 Θεωρητικό μέρος

Η γνώση της θεωρίας πίσω από οποιοδήποτε φυσικό, χημικό φαινόμενο, αποτελεί το κλειδί για την επιτυχή διαχείριση προβλημάτων τους, που απαιτούνται να επιλυθούν. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αναπτύσσονται οι θεωρητικές αρχές που κρύβονται πίσω από την έννοια της *αυτοσυμπυκνωσιμότητας* και της *ρεολογίας* του σκυροδέματος και του κονιάματος, καθώς επίσης και οι μαθηματικές αρχές που συνθέτουν έναν *αλγόριθμο νευρωνικών δικτύων*. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική περιγραφή των διάφορων μεθόδων μελέτης συνθέσεων που εντοπίστηκαν στην βιβλιογραφία, ενώ περιγράφεται επίσης και η πειραματική μεθοδολογία αξιολόγησης ενός μίγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και αυτοσυμπυκνούμενου κονιάματος

2.1 Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα

2.1.1 Μελέτη Σύνθεσης Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (Mix Design) – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (Guidelines & Concrete, 2005), ο συνδυασμός των ιδιοτήτων της *καλής ρευστότητας* και της *αντοχής έναντι διαχωρισμού* των υλικών ενός νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ), προσδίδει στο συγκεκριμένο δομικό υλικό, μετά τη σκλήρυνσή του, μία σειρά από σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως είναι το υψηλό επίπεδο ομοιογένειας, η ελαχιστοποίηση του πορώδους, καθώς και η ομοιόμορφη θλιπτική αντοχή του. Οι συγκεκριμένες ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ, όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή, είναι μεταξύ τους *αντίθετες* και για αυτόν τον λόγο η σύνθεση τέτοιου είδους σκυροδέματος απαιτείται να ακολουθεί με περισσή ευλάβεια συγκεκριμένους κανόνες (*μελέτες συνθέσεων*), προκειμένου να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Δεδομένου ότι η τελική μορφή των μιγμάτων ΑΣΣ είναι ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα με αναρίθμητους παράγοντες να το επηρεάζουν, προβλεπόμενους και μη, δεν είναι δυνατό να οριστεί μία συγκεκριμένη μελέτη σύνθεσης ΑΣΣ. Διάφορα ακαδημαϊκά ιδρύματα, μονάδες έτοιμου σκυροδέματος, μονάδες προκατασκευής κ.α., έχουν αναπτύξει και συνεχίζουν να αναπτύσσουν τις δικές τους μεθόδους παρασκευής του ΑΣΣ. Κοινό χαρακτηριστικό όλων τους είναι πως θεωρούνται πετυχημένες όταν το παραγόμενο προϊόν έχει υποβληθεί επιτυχώς σε όλες τις εργαστηριακές δοκιμές που αφορούν ΑΣΣ σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση (βλ. Ενότητα 2.1.3), δηλαδή όταν το σκυρόδεμα πληροί όλα τα κριτήρια *ρευστότητας, ικανότητας πλήρωσης, ιξώδους, διαπεραστικής ικανότητας, αντίστασης στην απόμιξη, αντοχής, κοκ*, προκειμένου να χαρακτηριστεί ως αυτοσυμπυκνούμενο. Η κύρια παράμετρος που συμβάλλει στο χαρακτηρισμό αυτόν, είναι ο *όγκος των επιμέρους βασικών συστατικών*, μιας και η ανάγκη για υπερπλήρωση των κενών, που δημιουργούνται μεταξύ των αδρανών, στο νωπό κονίαμα, είναι ζωτικής σημασίας. Για τον λόγο αυτόν, κάποιες μέθοδοι αξιολογούν και βελτιστοποιούν της ροή και τη σταθερότητα της αρχικής πάστας (τσιμέντο, τσιμεντοειδή υλικά, πρόσθετα, αναμεμειγμένα με νερό) και στη συνέχεια του κλάσματος του κονιάματος, προτού προστεθούν τα χονδρόκοκκα αδρανή και λάβουν χώρα οι δοκιμές (Guidelines & Concrete, 2005).

Οι Ευρωπαϊκές Οδηγίες, παρουσιάζουν μία βασική μελέτη σύνθεσης για την παραγωγή ΑΣΣ. Εν συντομία, η μελέτη αυτή περιλαμβάνει την εργαστηριακή πιστοποίηση των ιδιοτήτων του αρχικού μίγματος. Εάν τα συστατικά του μίγματος δεν συμβαδίζουν με τα προβλεπόμενα χαρακτηριστικά αυτού, πραγματοποιούνται οι κατάλληλες τροποποιήσεις,

επιτρέποντας έτσι στις δοκιμές του τελικού προϊόντος, νωπού και σκληρυμένου, να λάβουν χώρα (οι δοκιμές αυτές γίνονται τόσο στο εργοστάσιο παραγωγής ΑΣΣ, όσο και στο εργοτάξιο όπου χρησιμοποιείται). Αναλυτικά, η μελέτη συνθέσεως κατά τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για το ΑΣΣ περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Guidelines & Concrete, 2005):

1. Αξιολόγηση της *ανάγκης της πάστας του μίγματος σε νερό και βελτιστοποίηση, της ροής και της σταθερότητάς του.*
2. Προσδιορισμός της αναλογίας της άμμου και της ποσότητας του πρόσθετου (admixture) ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη ευρωστία³.
3. Έλεγχος της ευρωστίας του μίγματος, μεταβάλλοντας ελαφρώς τις ποσότητες ορισμένων συστατικών του.
4. Προσθήκη της κατάλληλης ποσότητας χονδρόκοκκων αδρανών.
5. Παρασκευή του νωπού ΑΣΣ στον αναμεικτήρα του εργαστηρίου και εκτέλεση των απαιτούμενων εργαστηριακών δοκιμών.
6. Εκτέλεση και των απαιτούμενων εργαστηριακών δοκιμών για το σκληρυμένο ΑΣΣ ώστε να ελεγχθούν και οι τελικές ιδιότητες.
7. Παραγωγή δοκιμαστικών μιγμάτων για το συγκεκριμένο υλικό στους αναμεικτήρες του εργοστασίου παραγωγής.

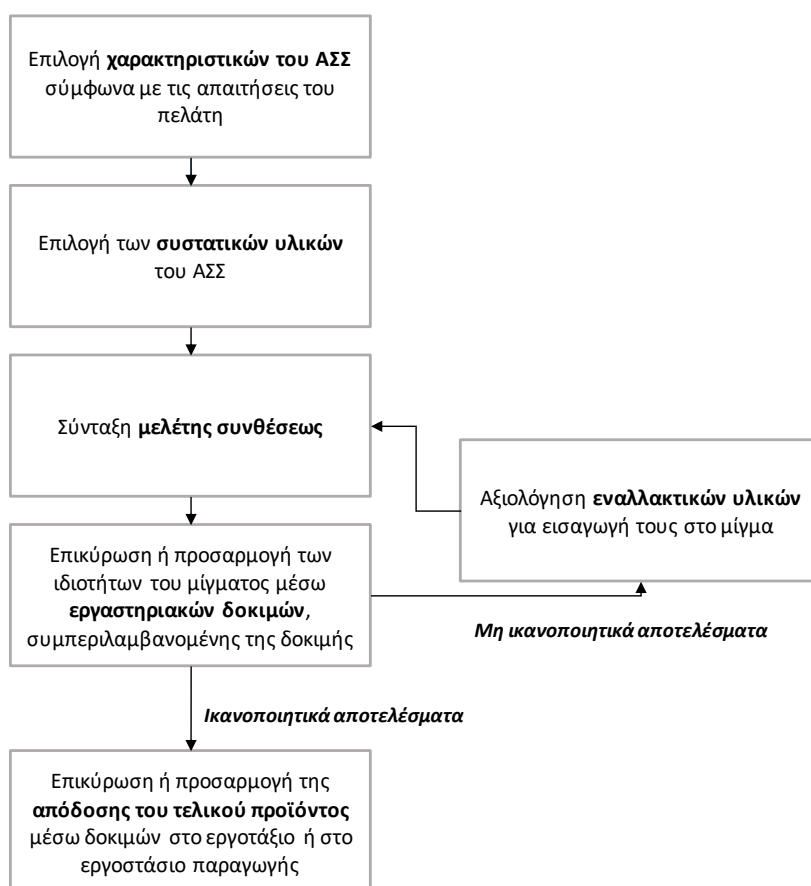
Στην περίπτωση που από τα βήματα 5 και 6 δεν προκύψουν τα επιθυμητά-αναμενόμενα αποτελέσματα, η μελέτη σύνθεσης θα πρέπει να αναθεωρηθεί. Ανάλογα με το λόγο για τον οποίο κάποια από τις εργαστηριακές δοκιμές απέτυχε, εφαρμόζονται οι ακόλουθες τακτικές ώστε να προκύψει τελικά ΑΣΣ:

1. Προσαρμογή του *λόγου τσιμέντου/κόνεων* (cement/powder) και του *λόγου νερού/κόνεων* (cement/powder) και έλεγχος της ροής και γενικά των ιδιοτήτων της αρχικής πάστας.
2. Στην περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν διαφορετικού είδους *πρόσθετα*, γίνεται προσθήκη τους στο μίγμα.
3. Προσαρμογή της *αναλογίας των λεπτόκοκκων αδρανών* (fine aggregates) και του *υπερρευστοποιητή*.
4. Στην περίπτωση που το μίγμα είναι ευαίσθητο στις αλλαγές, μπορεί να γίνει χρήση του *παράγοντα τροποποίησης ιξώδους* (viscosity modifying agent, VMA).
5. Προσαρμογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης των χονδρόκοκκων αδρανών.

Η πορεία που ακολουθείται στον συγκεκριμένο σχεδιασμό, είτε αυτός είναι επιτυχής με την πρώτη προσπάθεια είτε όχι, παρουσιάζεται γραφικά στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 2).

³ Η έννοια της *Ευρωστίας* χαρακτηρίζει τα υλικά των οποίων οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται όταν αλλάζουν κάποια χαρακτηριστικά τους. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, αυτό χαρακτηρίζεται από ευρωστία όταν για μικροαλλαγές-διακυμάνσεις στις ποσότητες των συστατικών του, οι «νωπές» και «σκληρυμένες» ιδιότητές του παραμένουν αμετάβλητες. Συγκεκριμένα, ένα καλά σχεδιασμένο ΑΣΣ που χαρακτηρίζεται από ευρωστία, τυπικά μπορεί να δεχθεί αλλαγή 5-10 λίτρων περιεχόμενου νερού ανά κυβικό μέτρο μίγματος (litre/m³) δίχως να αλλάξουν οι ρεολογικές του ιδιότητες. Η συγκεκριμένη ανεκτικότητα σε τέτοιου είδους αλλαγές είναι εφικτή όταν χρησιμοποιούνται υλικά από αξιόπιστες πηγές, στα οποία γίνεται σωστή αποθήκευση και διαχείριση, όταν το περιεχόμενο των λεπτόκοκκων κόνεων (fine powders) είναι το κατάλληλο για το μίγμα, καθώς και όταν προστίθεται VMA.

[<https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/robustness> ορισμός του όρου «robustness», (Guidelines & Concrete, 2005)]



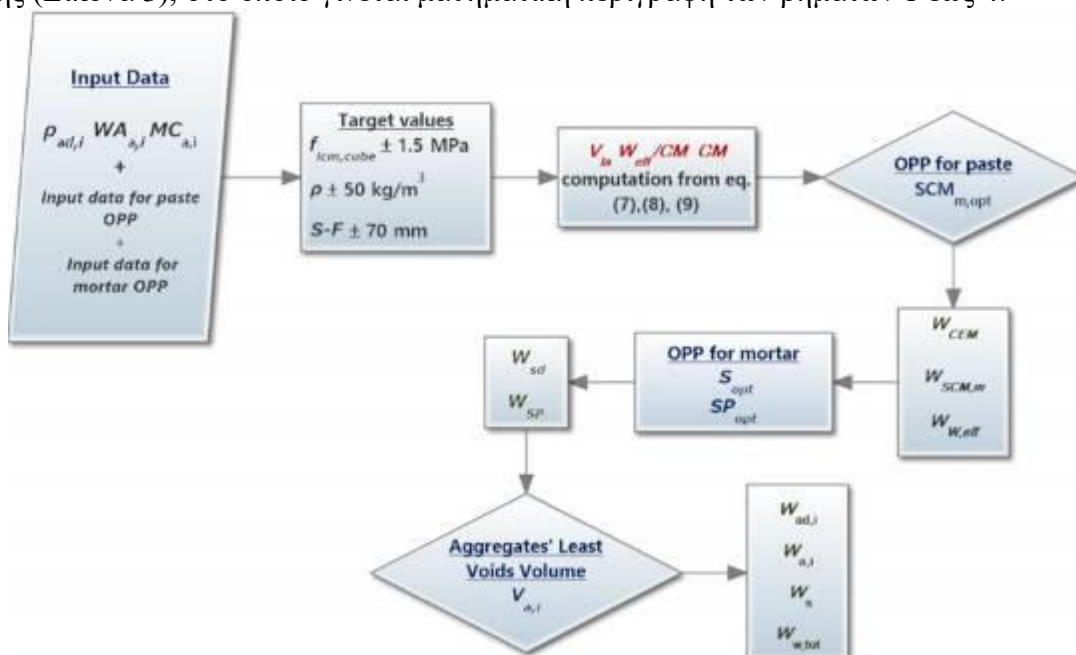
Εικόνα 2 Μελέτη Συνθέσεως κατά τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες. (Guidelines & Concrete, 2005)

Μία διαφορετική μελέτη συνθέσεως ΑΣΣ, προτάθηκε από τους Kaffetzakis et al (Kaffetzakis & Papanicolaou, 2016). Σε αντίθεση με τη μελέτη συνθέσεως των Ευρωπαϊκών οδηγιών, η συγκεκριμένη μελέτη «υπόσχεται» το τελικό μίγμα να χαρακτηρίζεται ως αυτοσυμπυκνούμενο, χωρίς αλλαγές κατά τη διάρκεια της σύνθεσής του. Η μεθοδολογία αφορά *αυτοσυμπυκνούμενο ελαφροσκυρόδεμα* (ΑΣΣ που περιέχει δηλαδή αδρανή με μικρότερο βάρος, όπως είναι η ελαφρόπετρα), και ονομάζεται *ημι-αυτοματοποιημένη μελέτη συνθέσεως αυτοσυμπυκνούμενου ελαφροσκυροδέματος* (Semi-automated LWASCC optimum mix design procedure). Στηρίζεται, επί της ουσίας, στη διαδικασία βελτιστοποίησης της στοιβαξης των αδρανών (Optimum Packing Point, OPP, procedure) σύμφωνα με την οποία επιτυγχάνεται η υψηλότερη δυνατή συγκέντρωση των στερεών συστατικών που ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια αυτοσυμπύκνωσης.

Για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης μελέτης συνθέσεως, πληθώρα μιγμάτων δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο OPP. Οι παράμετροι-κλειδιά της σύνθεσης των μιγμάτων αυτών (όπως είναι η ογκομετρική αναλογία των αδρανών και της άμμου και ο λόγος νερού προς τσιμεντοειδή υλικά), συσχετίστηκαν *στατιστικά* με επιλεγμένα χαρακτηριστικά της νωπής και σκληρυμένης φάσης τους (όπως είναι το oven-dry density, το slump-flow και η θλιπτική αντοχή 28 ημερών), με αποτέλεσμα να προκύψει η εν λόγω μεθοδολογία. Συνοπτικά, τα βήματά της είναι:

1. Αναφορικά με την *πάστα* (paste), προσδιορίζεται η βέλτιστη αναλογία τσιμεντοειδών υλικών προς τσιμέντο, κι άρα και η ποσότητα στο τελικό μίγμα των συγκεκριμένων συστατικών.
2. Αναφορικά με το *κονίαμα* (mortar), προσδιορίζονται οι βέλτιστοι λόγοι άμμου προς τσιμέντο και υπερρρευστοποιητή προς τσιμέντο, κι άρα και η ποσότητα στο τελικό μίγμα των συγκεκριμένων συστατικών.
3. Αναφορικά με τα *αδρανή*, υπολογίζεται ο όγκος λιγότερων κενών στο σκελετό των αδρανών, η αναλογία χονδρόκοκκων προς λεπτόκοκκων αδρανών κι άρα και η ποσότητα στο τελικό μίγμα των συγκεκριμένων συστατικών.
4. Αναφορικά με το τελικό μίγμα, γίνεται προσαρμογή του νερού που πρέπει να προστεθεί σύμφωνα με το υπάρχον νερό στο μίγμα, και την απορροφητικότητα των αδρανών.

Η αναλυτική διαγραμματική απεικόνιση της μεθόδου εμφανίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής (Εικόνα 3), στο οποίο γίνεται μαθηματική περιγραφή των βημάτων 1 έως 4.



Εικόνα 3 Ημι-αυτοματοποιημένη μελέτη συνθέσεως αυτοσυμπυκνούμενου ελαφροσκυροδέματος μεταφρασμένη σε ένα διάγραμμα ροής, με:

- ρ_{ad,i}: πυκνότητα των στεγνών αδρανών (dry aggregates),
- WA_{a,i}: απορρόφητικότητα των στεγνών αδρανών (% του βάρους των στεγνών συστατικών),
- MC_{a,i}: ποσοστό υγρασίας των στεγνών αδρανών (% του βάρους των στεγνών συστατικών),
- S_{opt}: βέλτιστη ποσότητα υπερρρευστοποιητή (% του βάρους του τσιμέντου),
- V_{a,i}: ογκομετρικό κλάσμα (volumetric fraction) των αδρανών (μέγεθος κόκκου >4 mm),
- W_x: ποσότητα του τελικού μίγματος αυτοσυμπυκνούμενου ελαφροσκυροδέματος.

Μία ακόμα μελέτη συνθέσεως ΑΣΣ, βασίζεται στη μέθοδο *Taguchi*⁴ (Taguchi method). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία συνδυάζει τη *σχεδίαση μιας πειραματικής διαδικασίας* με την *βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου* της, προκειμένου να επιτευχθούν, τελικά, τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Ο όρος της βελτιστοποίησης στη συγκεκριμένη μέθοδο, αναφέρεται στον προσδιορισμό των *καλύτερων δυνατών επιπέδων παραγόντων ελέγχου* (best

⁴ Πηγή πληροφοριών για τη μέθοδο Taguchi:
https://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV_PRA_TAGUCHI_INTRO.htm

levels of control factors), οι οποίοι μεγιστοποιούν τις αναλογίες Signal-to-Noise (οι αναλογίες αυτές αποτελούν λογαριθμικές συναρτήσεις των επιθυμητών τελικών χαρακτηριστικών των πειραμάτων). Οι πειραματικές διαδικασίες που έχουν ως σκοπό να προσδιορίσουν τα καλύτερα αυτά επίπεδα, βασίζονται στους *Ορθογωνικούς Πίνακες* (Orthogonal Arrays) και ισορροπούν, μεταξύ τους, το βέλτιστο προσδιορισμό των παραμέτρων ελέγχου, τον ελάχιστο δυνατό αριθμό πειραματικών διαδικασιών, τις ελάχιστες δυνατές ποσότητες των απαιτούμενων συστατικών και τους ελάχιστους δυνατούς χρόνους. Η μέθοδος Taguchi περιλαμβάνει τα ακόλουθα οκτώ (8) βήματα *σχεδιασμού, διεξαγωγής πειραμάτων, ανάλυσης και επικύρωσης αποτελεσμάτων*:

1. Προσδιορισμός της κύριας συνάρτησης, των παράπλευρων απωλειών και της κατάστασης αποτυχίας (main function, side effects, failure mode).
2. Προσδιορισμός των παραμέτρων του «θορύβου» (noise factors), των συνθηκών των πειραμάτων και της ποιότητας των χαρακτηριστικών τους.
3. Προσδιορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί.
4. Προσδιορισμός των παραμέτρων ελέγχου (control factors) και των επιπέδων τους.
5. Επιλογή του ορθογωνικού πίνακα διανυσμάτων για τη διεξαγωγή του πειράματος (orthogonal array matrix experiment).
6. Διεξαγωγή του πίνακα πειραμάτων.
7. Ανάλυση των δεδομένων που προκύπτουν και πρόβλεψη των βέλτιστων επιπέδων και της απόδοσης.
8. Εκτέλεση του πειράματος επαλήθευσης και σχεδιασμός των μελλοντικών δράσεων.

Οι Teimortashlu et al (Teimortashlu et al, 2018), χρησιμοποίησαν τη συγκεκριμένη μεθοδολογία με σκοπό να βελτιστοποιήσουν τη *θλιπτική αντοχή τριμερών αυτοσυμπυκνόμενων κονιαμάτων*. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις (3) παράμετροι, οι οποίοι αντιστοιχούν στο ποσοστό που βρίσκεται στο μίγμα κάθε ουσία που το χαρακτηρίζει ως τριμερές. Από τα διαφορετικά μίγματα που δημιουργήθηκαν, η μέθοδος Taguchi προέβλεψε τα αποτελέσματα από κάθε δοκιμή για την προς μελέτη πάστα με καλή προσέγγιση και πρότεινε τη βέλτιστη. Όταν κάποιο αποτέλεσμα προέκυπτε διαφορετικό από τα άλλα έτσι ώστε η τυπική απόκλιση (COV) να είναι μεγάλη, τότε το αποτέλεσμα αυτό απορρίπτονταν και οι μέσοι όροι υπολογίζονταν από τα υπόλοιπα αποτελέσματα.

Η μέθοδος *Nepotusceno* ανήκει κι αυτή στις κατηγορίες της μελέτης σύνθεσης αυτοσυμπυκνόμενων κονιαμάτων. Ορίζει το τσιμέντο και τα ορυκτολογικά πρόσθετα (mineral additions) ως κονίες (powders) και την άμμο ως λεπτόκοκκο αδρανές (fine aggregates). Σκοπό έχει να δημιουργήσει *μίγματα με επαρκή ρεολογικά χαρακτηριστικά και θλιπτική αντοχή* ίση με αυτή που απαιτείται ανά περίπτωση, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

1. Επιλογή των λεπτόκοκκων αδρανών και προσδιορισμός του μοναδιαίου όγκου τους ως ποσοστό του συνολικού όγκου, V_s .
2. Εφόσον στο κονίαμα πρόκειται να προστεθούν χονδρόκοκκα αδρανή ώστε να δημιουργηθεί ΑΣΣ, επιλέγεται από πίνακες η επιθυμητή θλιπτική αντοχή του κονιάματος, ανάλογα με την επιθυμητή αντοχή του ΑΣΣ.
3. Επιλογή του τύπου του τσιμέντου και του λόγου νερού προς τσιμέντο, W/C , ανάλογα με την αντοχή.
4. Επιλογή του είδους του πρόσθετου και προσδιορισμός του λόγου του όγκου των κόνεων προς τον όγκο των λεπτόκοκκων αδρανών κοντά στο εύρος τιμών 0,7-0,8 ($V_p/V_s \approx 0.7-0.8$).

5. Από συγκεκριμένα νομογραφήματα, επιλέγεται το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου από το πρόσθετο.
6. Ορισμός των λόγων όγκου νερού προς όγκο κόνεων (V_w/V_p) και μάζας υπερρευστοποιητή προς μάζα κόνεων σύμφωνα με πίνακες, και διεξαγωγή πειραμάτων V-Funnel και Slump-Flow για την προσαρμογή τους, αντίστοιχα.
7. Εφόσον στο κονίαμα πρόκειται να προστεθούν χονδρόκοκκα αδρανή ώστε να δημιουργηθεί ΑΣΣ, ορίζεται ο όγκος των κενών των αδρανών, ο λόγος του όγκου του κονιάματος προς τον όγκο των χονδρόκοκκων αδρανών, η μέγιστη διάμετρος αδρανών και η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης των χονδρόκοκκων αδρανών.

(A. Lozano-Lunar et al, 2019a; M. Nepomuceno et al, 2012)

Η τελευταία μελέτη συνθέσεως που περιγράφεται στην παρούσα εργασία, είναι η *Response Surface Method* (RSM). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, ανήκει στην κατηγορία του Σχεδιασμού των Πειραμάτων (design of experiments, DoE), όπου πραγματοποιούνται στατιστικές προσεγγίσεις με σκοπό την ανάλυση της επιρροής που έχουν τα εισαγόμενα χαρακτηριστικά της πάνω στα εξερχόμενα. Η RSM στοχεύει στην εύρεση των σχέσεων μεταξύ των εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών που σχετίζονται με την πειραματική διαδικασία.

Οι Mahdi Safhi et al (Safhi et al, 2019), χρησιμοποίησαν τη συγκεκριμένη μεθοδολογία για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου κονιάματος. Αυτή έλαβε χώρα έχοντας ως παραμέτρους εισόδου του λόγους νερό προς συνδετικό υλικό (binder), πρόσθετα προς τσιμέντο και όγκο του συνδετικού υλικού προς συνολικό όγκο κονιάματος. Το μοντέλο που τη χαρακτηρίζει, αποτελεί μία εξίσωση δευτέρου βαθμού.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο κατάλληλος συνδυασμός ιδιοτήτων ενός ΑΣΣ ή ενός ΑΣΚ κατά τη μελέτη σύνθεσής του, οποιαδήποτε κι αν είναι αυτή, είναι ωφέλιμο να γίνει η μετάφραση των *ιδιοτήτων* των υλικών αυτών, στη γλώσσα των ιδιοτήτων των συστατικών τους υλικών σύμφωνα με τις *Αρχές Μελέτης Σύνθεσης*. Οι Ευρωπαϊκές Οδηγίες προτείνουν ότι, αναφορικά με τη *ρευστότητα* (fluidity) και το *ιξώδες* (viscosity) της πάστας (βλ. Ενότητα 2.2), η επιλογή και η αναλογία του τσιμέντου και των προσθέτων πρέπει να είναι προσεκτική ώστε να προκύψει ο επιθυμητός λόγος νερού προς κόνιες (water to powder ratio). Τότε, και μόνο τότε, προστίθεται στο μίγμα ο υπερρευστοποιητής (superplasticizer) και, προαιρετικά, ο παράγοντας τροποποίησης ιξώδους (VMA). Ο σωστός έλεγχος των συγκεκριμένων συστατικών, όπως επίσης η συμβατότητα και η αλληλεπίδρασή τους, είναι το κλειδί για την επίτευξη καλής *ικανότητας πλήρωσης*, καλής *διαπεραστικής ικανότητας* και καλής *αντίστασης έναντι διαχωρισμού* των υλικών, χαρακτηριστικών δηλαδή που πηγάζουν από τη ρευστότητα και το ιξώδες της πάστας. Με άλλα λόγια, τα βασικά χαρακτηριστικά της αυτοσυμπυκνωσιμότητας ενός μίγματος, σκυροδέματος ή κονιάματος, έχουν τις θεμέλιες λίθους τους στον *κατάλληλο προσδιορισμό των βασικών συστατικών του μίγματος*, και όχι αποκλειστικά και μόνο στην προσθήκη του υπερρευστοποιητή.

Αναφορικά με την *αύξηση της θερμοκρασίας* και τη *συστολή* του μίγματος κατά τις αντιδράσεις ενυδάτωσης, όπως επίσης και με την *τελική αντοχή* του, τα πρόσθετα θα πρέπει να περιέχουν μία σημαντική ποσότητα αδρανών, ημι-αδρανών, ποζολανικών ή υδραυλικών πρόσθετων υλικών (πρόσθετα Τύπου Ι ή Τύπου ΙΙ, σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες, 2005). Η ποσότητα του τσιμέντου λόγω των συγκεκριμένων προσθηκών μειώνεται, με αποτέλεσμα οι επιδράσεις στο τελικό προϊόν των αντιδράσεων ενυδάτωσης να είναι πιο ήπιες.

Η επόμενη ιδιότητα που πρέπει να έχουν τα συστατικά των υλικών του ΑΣΣ ή του ΑΣΚ, έχει να κάνει με την τσιμεντόπαστα και αποτελεί την κύρια παράμετρο που συμβάλλει στο

χαρακτηρισμό ενός μίγματος ως αυτοσυμπυκνούμενο, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην Ενότητα 2.1.1. Η πάστα αυτών των μιγμάτων, αποτελεί το υλικό το οποίο κατά τη ροή ενός νωπού ΑΣΣ ή ΑΣΚ, κινεί τα αδρανή παρασύροντάς τα. Η ροή των αδρανών, επιτυγχάνεται όταν ο όγκος της πάστας είναι μεγαλύτερος από τον όγκο των κενών που αφήνουν μεταξύ τους τα αδρανή. Έτσι, κάθε ξεχωριστός κόκκος αδρανούς, είτε αυτό είναι χονδρόκοκκο (ΑΣΣ) είτε είναι λεπτόκοκκο (ΑΣΚ, ΑΣΣ), είναι πλήρως περιβεβλημένος-επικαλυμένος, και άρα λιπασμένος, από μία στρώση πάστας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ρευστότητα του μίγματος και να ελαττώνεται η τριβή μεταξύ τους.

Τέλος, ένα ακόμη χαρακτηριστικό που πρέπει να έχουν τα συστατικά των μιγμάτων ώστε η διαπεραστική ικανότητα του νωπού ΑΣΣ να θεωρείται δεδομένη, είναι ο *χαμηλός λόγος των χονδρόκοκκων αδρανών προς τα λεπτόκοκκα αδρανή*. Όταν ο λόγος αυτός μειωθεί, σημαίνει ότι η ποσότητα των χονδρόκοκκων αδρανών είναι αρκετά μικρότερη από αυτή των λεπτόκοκκων, με αποτέλεσμα αυτά να είναι πλήρως επικαλυμμένα από νωπό κονίαμα. Συνεπώς επιτυγχάνεται συνολική μείωση της εμπλοκής μεταξύ χονδρόκοκκων αδρανών, όταν το νωπό ΑΣΣ διέρχεται από στενά ανοίγματα ή μικρά κενά μεταξύ οπλισμών.

Έχοντας αφομοιώσει τις έννοιες που προηγήθηκαν σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες (Guidelines & Concrete, 2005), μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι τα χαρακτηριστικά της αυτοσυμπύκνωσης ενός μίγματος, δίδονται σε αυτό κατά το ενδιάμεσο στάδιο παρασκευής του υλικού, το οποίο αντιστοιχεί στη *σύνθεση του κονιάματος*. Η έννοια της αυτοσυμπύκνωσης, συνδυάζει τις έννοιες της *επαρκούς ρευστότητας* του μίγματος, προκειμένου να μην χρειάζεται συμπύκνωση κατά την τοποθέτησή του στους τύπους, και του *ιξώδους*, ώστε να υπάρχει συνοχή. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αποτελούν χαρακτηριστικά ενός ρευστού υλικού (βλ. Ενότητα 2.2), το οποίο στην περίπτωση του σκυροδέματος, είναι η πάστα αναμεμιγμένη με τα λεπτόκοκκα αδρανή (πχ. άμμος), δηλαδή το *κονίαμα*. Το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να διατυπωθεί και από την εργασία των Nepomuceno et al (M. C. S. Nepomuceno et al, 2014). Εκεί, παρατηρήθηκε πως όταν ο όγκος των χονδρόκοκκων αδρανών στα μίγματα σκυροδέματος αυξηθεί, και κατά συνέπεια ο όγκος του κονιάματος μειωθεί, απαιτείται αντιστάθμιση στη φάση του κονιάματος για να διατηρηθεί το ίδιο επίπεδο αυτοσυμπυκνωσιμότητας. Έτσι σε επίπεδο κονιάματος απαιτείται αύξηση της αναλογίας μεταξύ του όγκου της πάστας και του όγκου των λεπτόκοκκων αδρανών (η τελευταία αρχή μελέτης σύνθεσης ΑΣΣ σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες). Με άλλα λόγια, μία αύξηση στο στερεό μέρος του μίγματος επιβάλλει μία αύξηση και στο ρευστό, ειδικά η έννοια της αυτοσυμπύκνωσης δεν μπορεί να οριστεί. Οι Teimortashlu et al (Teimortashlu et al, 2018), επίσης καταλήγουν στο ίδιο συμπέρασμα υποστηρίζοντας πως η πάστα και τα λεπτόκοκκα αδρανή του σκυροδέματος (κονίαμα) αποτελούν τη βάση για τις ιδιότητες που έχει το ΑΣΣ, επομένως οι ιδιότητες αυτές μπορούν να αξιολογηθούν σύμφωνα με τα ΑΣΚ.

Συνοπτικά, οι αρχές μελέτης σύνθεσης ΑΣΣ καταλήγουν πως ένα μίγμα ΑΣΣ, συγκριτικά με ένα μίγμα συνήθους σκυροδέματος, θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από (Guidelines & Concrete, 2005; Kaffetzakis & Papanicolaou, 2016; M. C. S. Nepomuceno et al, 2014):

1. χαμηλότερο λόγο χονδρόκοκκων αδρανών προς λεπτόκοκκων αδρανών,
2. αυξημένη περιεχόμενη πάστα (προσδίδει τα κύρια χαρακτηριστικά αυτοσυμπυκνωσιμότητας στο μίγμα),
3. προσεκτική επιλογή είδους και ποσότητας τσιμέντου και προσθέτων⁵ (προσδίδει συγκεκριμένο ιξώδες),

⁵ Σύμφωνα με τους Nepomuceno et al (M. C. S. Nepomuceno et al, 2014), όταν ο όγκος των κόνεων, τσιμέντου και προσθέτων, ξεπεράσει ένα όριο (0.210 m³), η ιδιότητα της αυτοσυμπύκνωσης παύει να εξαρτάται από το είδος του τσιμέντου και εξαρτάται πλέον από τον όγκο αυτόν.

4. χαμηλό λόγο νερού προς τσιμέντο (προσδίδει συγκεκριμένη αντοχή θλίψεως και συγκεκριμένο ιξώδες),
 5. αυξημένη ποσότητα υπερρευστοποιητή (προσδίδει συγκεκριμένη τάση διαρροής στο νωπό ΑΣΣ ή ΑΣΚ) και
- προσθήκη παράγοντα τροποποίησης ιξώδους κατά περίπτωση.

2.1.2 Συστατικά Υλικά Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος και Κονιάματος

Το είδος των υλικών από τα οποία αποτελείται το ΑΣΣ δε διαφέρει από το είδος των υλικών από τα οποία αποτελείται το συμβατικό σκυρόδεμα. Το νερό, το τσιμέντο, τα πρόσθετα, τα αδρανή και τα χημικά πρόσμικτα χρησιμοποιούνται και στις δύο περιπτώσεις σκυροδέματος, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση του ΑΣΣ οι αναλογίες τους είναι διαφορετικές και η ποιότητα ακολουθεί αυστηρά τις προδιαγραφές. Αυτό συμβαίνει καθώς δεδομένης της αυτοσυμπυκνωσιμότητας των κονιαμάτων, η οποία «παντρεύει» δύο αντίθετα ορισμένες έννοιες: τη ρευστότητα και το ιξώδες, είναι σημαντικό στα συστατικά υλικά ενός ΑΣΣ να δίδεται από τον αρμόδιο μηχανικό περισσότερη προσοχή από αυτή που θα δίδονταν στην περίπτωση του κοινού σκυροδέματος. Με αυτόν τον τρόπο, το τελικό προϊόν εξασφαλίζει ομοιόμορφη και σταθερή απόδοση.

Το κύριο συστατικό που καθιστά ένα μίγμα ως μίγμα οποιουδήποτε είδους σκυροδέματος, είναι το *τσιμέντο* (cement). Για την παρασκευή ΑΣΣ, όλα τα είδη τσιμέντου που αναγράφονται στον EN 197-1 μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η σωστή επιλογή δεν κρύβεται μόνο στις απαιτήσεις της εφαρμογής όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το ΑΣΣ, αλλά και στη διαθεσιμότητα σε τσιμέντο που έχει ο παραγωγός ΑΣΣ, πέρα από τις ειδικές απαιτήσεις του ίδιου του υλικού (Guidelines & Concrete, 2005).

Για τη διατήρηση της συνοχής του μίγματος του νωπού ΑΣΣ καθώς και την αντίσταση σε απόμιξη, χρησιμοποιούνται ως συστατικά διάφορα *πρόσθετα* (additions), τα οποία χωρίζονται στις κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 1. Κάθε διαφορετικό είδος προσθέτου, προσφέρει στο μίγμα του ΑΣΣ διαφορετικές ιδιότητες, ανάλογα με τη χημική του σύσταση. Η κοκκομετρική κατανομή, το σχήμα και το ποσοστό υγρασίας των *ορυκτολογικών πληρωτικών υλικών* (mineral fillers), είναι χαρακτηριστικά ικανά να ελέγξουν τις απαιτήσεις του μίγματος σε νερό, τη σταθερότητά του, καθώς και την υψηλή του αντοχή και ανθεκτικότητα μετά την σκλήρυνσή του (A. Lozano-Lunar et al, 2019a), καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση στο ΑΣΣ. Συγκεκριμένα, η σταθερότητά του μαζί με τη συνοχή του, μπορούν να επιτευχθούν με την προσθήκη *ιπτάμενης τέφρας* (fly ash). Υψηλές ποσότητες του συγκεκριμένου ποζολανικού υλικού όμως, οδηγούν στη δημιουργία πάστας με υπερβολική συνοχή κι άρα με αντίσταση στη ροή. Τα υψηλά επίπεδα λεπτότητας (fineness) και το σχεδόν σφαιρικό σχήμα της *πυριτικής παιπάλης* (silica fume), δημιουργούν μίγμα που χαρακτηρίζεται επίσης συνεκτικό, και ανθεκτικό έναντι απόμιξης. Αντίστοιχα με την ιπτάμενη τέφρα, υψηλές ποσότητες πυριτικής παιπάλης επιφέρουν αρνητικές συνέπειες στο νωπό ΑΣΣ, μιας και το συγκεκριμένο πρόσθετο είναι τόσο αποτελεσματικό στην πρόληψη αποβολής υγρού από το μίγμα (bleeding) που μπορεί να δημιουργηθεί ένας σκληρός φλοιός στην επιφάνειά του μίγματος, με αποτέλεσμα η τελική επιφάνεια του υλικού να μην είναι η επιθυμητή. Η *σκωρία υψικαμίνου* (ground blastfurnace slag) προσφέρει χαμηλή έκλυση θερμότητας κατά τις αντιδράσεις ενυδάτωσης. Όταν η αναλογία της στο μίγμα είναι μεγαλύτερη από την επιτρεπτή, μετατρέπει το νωπό ΑΣΣ σε ασταθές μίγμα, που χαρακτηρίζεται από χαμηλή ευρωστία και υψηλό κίνδυνο απόμιξης (Guidelines & Concrete, 2005).

Πέρα από τα συνήθη πρόσθετα-πληρωτικά υλικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπάρχουν και πολλά άλλα, όπως είναι ο *μετακαολίνης* (metakaolin), οι *φυσικές ποζολάνες*

(natural pozzolana), το αλεσμένο γυαλί (ground glass), η αερόψυκτη σκωρία (air cooled slag), κ.α. (Guidelines & Concrete, 2005). Γενικά, αυτά τα υλικά μπορούν να αποτελούν και παραπροϊόντα βιομηχανικών και αγροτικών διεργασιών. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες να μελετώνται και να αξιολογούνται, ώστε να διευκρινιστούν όλες οι επιδράσεις που θα έχουν στο μίγμα, όταν προστεθούν σε αυτό, μιας και η συγκεκριμένη προσθήκη μπορεί να βελτιώσει την κατανομή των κόκκων των υλικών και να ελέγξει την απόδοση του νερού μίγματος (προκύπτουν πιο πυκνές δομές κοκκωδών υλικών και άρα μικρότερο πορώδες) (A. Lozano-Lunar et al, 2019a; Nguyen, 2019). Επιπλέον, έχουν την ιδιότητα ότι συμμετέχουν στην ποζολανική αντίδραση, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε ορισμένες περιπτώσεις προσθέτων. Κατά τη συγκεκριμένη χημική αντίδραση, πυριτικά ή αργιλικά άλατα αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που παράγεται κατά τις αντιδράσεις ενυδάτωσης των υδραυλικών υλικών (τσιμέντο και τσιμεντοειδή υλικά), μετατρέποντάς το σε ασβεστο-αργίλο-πυριτική γέλη η οποία πληρώνει το προκληθέν πορώδες λόγω της ύπαρξης των κρυστάλλων $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το μέγεθος των πόρων και δεν παρουσιάζονται μικρορωγμές στο τελικό προϊόν, ενώ ευνοούνται οι αντιδράσεις ενυδάτωσης (Nguyen, 2019; Nasr et al, 2019). Ένα παράδειγμα πρόσθετου υλικού που συνδυάζει τα οφέλη της βελτίωσης της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της ποζολανικής αντίδρασης, είναι ο μετακαολίνης. Αυξάνει την αντοχή του μίγματος, καθώς πληρώνει τα κενά του, και αποτελεί ποζολανικό υλικό. Όμως, επειδή οι ποζολανικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα πολύ αργά, στα αρχικά στάδια ζωής των δοκιμίων, όσο αυξάνεται η ποσότητα του μετακαολίνη στο μίγμα τόσο αυξάνεται το πορώδες του, μιας και οι αντιδράσεις δεν έχουν προλάβει να ολοκληρωθούν ακόμα (Benabed et al, 2020).

Πίνακας 1 Κατηγορίες προσθέτων, σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες για ΑΣΣ. Στον Τύπο I, ανήκουν τα αδρανή και ημι-αδρανή πρόσθετα, στα οποία ανήκουν τα ορυκτολογικά πληρωτικά υλικά όπως είναι ο ασβεστόλιθος ή ο δολομίτης. Στον Τύπο II, ανήκουν τα ποζολανικά πρόσθετα, στα οποία ανήκουν η ιπτάμενη τέφρα ή η πυριτική παιπάλη, καθώς και τα υδραυλικά πρόσθετα, στα οποία ανήκει η σκωρία υψικαμίνου.

TYPE I	Inert or semi-inert	<ul style="list-style-type: none"> • Mineral filler (limestone, dolomite etc) • Pigments
TYPE II	Pozzolanic	<ul style="list-style-type: none"> • Fly ash conforming to EN 450 • Silica fume conforming to EN 13263
	Hydraulic	<ul style="list-style-type: none"> • Ground granulated blast furnace slag (If not combined in an EN 197-1 cement, national standards may apply until the new EN 15167 standard is published)

Μία σημαντική λεπτομέρεια σχετικά με τα πρόσθετα-πληρωτικά υλικά που αξίζει να σημειωθεί, αποτελεί η επίδραση, στο τελικό προϊόν, της αντικατάστασης του τσιμέντου από αυτά (υπό την προϋπόθεση ότι έχουν την ίδια λεπτότητα με το τσιμέντο). Η συγκεκριμένη διαδικασία, δεν ελαττώνει μόνο την ποσότητα του τσιμέντου μέσα στο μίγμα, αλλά ωθεί και το προστιθέμενο νερό να εγκλωβιστεί στο πορώδες των πρόσθετων υλικών. Έτσι, ο λόγος νερού προς τσιμέντο, N/T , αυξάνεται και ταυτόχρονα ελαττώνεται το διαθέσιμο νερό για τις αντιδράσεις ενυδάτωσης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ικανοποιητική ποσότητα πάστας προκειμένου να καλύψει πλήρως τα λεπτόκοκκα αδρανή. Τότε, τα κενά και οι μικρορωγμές του τελικού προϊόντος αυξάνονται και η θλιπτική αντοχή του υλικού μειώνεται (Boukhelkhal et al, 2017).

Το επόμενο βασικό συστατικό οποιουδήποτε μίγματος σκυροδέματος ή κονιάματος, αποτελούν τα *αδρανή*, τα οποία χωρίζονται στις κατηγορίες των *χονδρόκοκκων* (coarse aggregates, EN 12620) και των *λεπτόκοκκων αδρανών* (fine aggregates, EN 13055-1)⁶. Χαρακτηριστικά τους όπως: το ποσοστό τους σε υγρασία (moisture content), η υδατοαπορροφητικότητα τους (water absorption), η κοκκομετρική διαβάθμισή τους (grading) καθώς και η ποικιλία των λεπτόκοκκων περιεχόμενων υλικών σε αυτά (variations in fines content of all aggregates), είναι ανάγκη να μελετώνται προκειμένου να παρασκευασθεί σταθερής ποιότητας ΑΣΣ ή ΑΣΚ (ευρωστία). Επιπλέον, το σχήμα (shape) τους και η κοκκομετρική τους κατανομή (particle size distribution) αποτελούν ορισμένα ακόμα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν άμεσα την στίβαξη των αδρανών, καθώς και τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ τους (ιδιότητες πολύ σημαντικές για τη μελέτη σύνθεσης ενός ΑΣΣ, σύμφωνα με την Ενότητα 2.1.1).

Τα *χονδρόκοκκα αδρανή*, χρησιμοποιούνται με επιτυχία για την παραγωγή ΑΣΣ, υπό την προϋπόθεση ότι έχει προβλεφθεί η πιθανή τους μετακίνηση προς την επιφάνεια του μίγματος, λόγω του ενδεχόμενου χαμηλού του ιξώδους (η πρόβλεψη λαμβάνει χώρα κατά την πειραματική διαδικασία για την απόμιξη των υλικών). Η μέγιστη διάμετρος τους κυμαίνεται από 12 έως 20 mm, ανάλογα με το ελάχιστο κενό μεταξύ οπλισμών, αλλά μπορούν να υπάρξουν και περιπτώσεις όπου τα χονδρόκοκκα αδρανή έχουν μεγαλύτερο μέγεθος. Όσο το σχήμα τους πλησιάζει ολοένα και περισσότερο το σχήμα της σφαίρας, τόσο λιγότερο πιθανό είναι να προκληθούν φαινόμενα εμπλοκής, κατά την έγχυσή του σε τύπους, , ενώ η ροή του μίγματος βελτιώνεται, αφού η εσωτερική τριβή των υλικών ελαττώνεται σημαντικά (Guidelines & Concrete, 2005).

Τα *λεπτόκοκκα αδρανή*, και κατ' επέκταση η φάση του κονιάματος σε αντίθεση με τη φάση του σκυροδέματος, επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ από ότι τα χονδρόκοκκα αδρανή. Παρά το ότι στα νωπά ΑΣΣ και ΑΣΚ, η μεγάλη ποσότητα της πάστας στα μίγματα βοηθάει πολύ στην μείωση της εσωτερικής τριβής, η κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση των λεπτόκοκκων αδρανών εξακολουθεί να είναι πολύ σημαντική, αφού επιτυγχάνει βελτιωμένη ρευστότητα, ακόμη και με μειωμένη προσθήκη πάστας στο μίγμα (Guidelines & Concrete, 2005). Η βελτίωση αυτή όμως, μπορεί να επιτευχθεί και με έναν διαφορετικό τρόπο. Η αντικατάσταση των αδρανών ενός μίγματος από άλλα του ίδιου είδους, με λίγο μεγαλύτερο μέγεθος, μπορεί να αυξήσει τη ρευστότητα του μίγματος κατά λίγο, υπό την προϋπόθεση ότι οι λόγοι νερού προς τσιμέντο (N/T) και τσιμέντου προς αδρανή ($T/άμμο$) παραμένουν σταθεροί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο πιο μικρά τα σωματίδια των αδρανών, τόσο μεγαλύτερη η ειδική τους επιφάνεια κι άρα τόσο πιο πολύ νερό απαιτούν (He et al, 2020). Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην περίπτωση που τα λεπτόκοκκα αδρανή προέρχονται από κάποιο *πορώδες υλικό*. Με την αύξηση σε ποσοστό του πορώδους υλικού στο μίγμα, η ρευστότητα μειώνεται καθώς το νερό που υπάρχει απορροφάται από το πορώδες του αδρανούς (Benli, Karatas, & Anil Toprak, 2020). Με άλλα λόγια, υποβαθμίζεται το ιξώδες του μίγματος, αλλά και η τελική θλιπτική του αντοχή, μιας και ελαττώνεται η πυκνότητα και οι αντιδράσεις ενυδάτωσης δε διεξάγονται επιτυχώς λόγω της ανεπάρκειας του νερού (Karatas et al, 2019). Τέλος, εάν τα λεπτόκοκκα αδρανή προέρχονται από *θραύσματα γυαλιού*, το μίγμα που δημιουργείται χαρακτηρίζεται από βελτιωμένη εργασιμότητα και απαιτεί μειωμένη ποσότητα υπερρρευστοποιητή (βλ. στη συνέχεια). Αυτό συμβαίνει καθώς τα αδρανή αυτά έχουν λεία επιφάνεια, που σημαίνει ότι αναπτύσσουν μειωμένη τριβή και άρα χαμηλή ικανότητα προσκόλλησης με το τσιμέντο

⁶ Οι κόκκοι των λεπτόκοκκων αδρανών οι οποίοι έχουν μέγιστη διάμετρο μικρότερη από 0.125 mm, θεωρείται ότι δεν ανήκουν στην κατηγορία των αδρανών, αλλά στην κατηγορία των προσθέτων, σε ένα μίγμα ΑΣΣ ή ΑΣΚ. Για τον λόγο αυτόν, προσμετρώνται κατά τον υπολογισμό του λόγου νερού προς κόνεων (water to powder ratio) (Guidelines & Concrete, 2005).

(συνάφεια), ενώ έχουν ελαττωμένη υδατοαπορροφητικότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά, οδηγούν σε χαμηλότερη αντοχή του τελικού προϊόντος (Benabed et al, 2020).

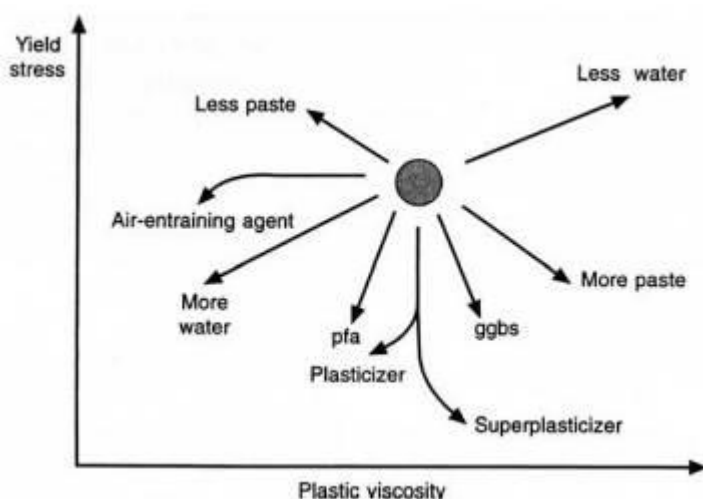
Τελευταίο συστατικό ενός μίγματος ΑΣΣ ή ΑΣΚ, αποτελούν τα *χημικά πρόσμικτα* (chemical admixtures). Στην κατηγορία του συστατικού αυτού, ανήκουν οι *υπερρευστοποιητές* (superplasticizers, SP), οι *παράγοντες τροποποίησης ιξώδους* (viscosity modifying admixtures, VMA), τα *αερακτικά* (air entraining), οι *επιταχυντές* (accelerators) και οι *επιβραδυντές* (retarders). Με εξαίρεση τα δύο πρώτα πρόσμικτα, τα υπόλοιπα προστίθενται στο μίγμα με τον τρόπο που θα προσθέτονταν σε οποιοδήποτε μίγμα κοινού σκυροδέματος, σύμφωνα με το EN 934-2. Οι υπερρευστοποιητές και οι παράγοντες τροποποίησης ιξώδους, αποτελούν αναγκαία αλλά όχι επαρκή προσθήκη στα νωπά ΑΣΚ, καθώς είναι οι ουσίες αυτές οι οποίες προσδίδουν τα χαρακτηριστικά της αυτοσυμπυκνωσιμότητας, αλλά μόνο σε κονιάματα τα οποία είναι σχεδιασμένα για να χαρακτηριστούν ως αυτοσυμπυκνούμενα. Με άλλα λόγια, εάν η σύσταση ενός κονιάματος δεν έχει τις κατάλληλες αναλογίες των συστατικών υλικών του, καθώς και τα κατάλληλα συστατικά υλικά, η προσθήκη SP και VMA είναι πολύ δύσκολο να μετατρέψει το κονίαμα σε αυτοσυμπυκνούμενο, με όλα τα χαρακτηριστικά που αυτό πρέπει να έχει. Σε κάθε περίπτωση επιλογής χημικού προσμίκτου, θα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά η συμβατότητά του με τα πρόσθετα και το συνδετικό υλικό (binder). Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των προσθέτων, όπως είναι η λεπτότητα, η περιεκτικότητα σε άνθρακα, η αλκαλικότητα, η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C₃A (αργλικό τριασβέστιο), κοκ., μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση των προσμίκτων, επομένως είναι αναγκαία η επιλογή του σωστού συνδυασμού, ανά περίπτωση (Guidelines & Concrete, 2005).

Ο ρόλος του *υπερρευστοποιητή* στο μίγμα είναι να μειώνει τις απαιτήσεις του σε νερό, να οδηγεί δηλαδή σε χαμηλό λόγο νερού προς συνδετικό υλικό (W/B, B=binder), ρυθμίζοντας παράλληλα τη ρευστότητά του (Guidelines & Concrete, 2005; Özcan & Emin Κορ, 2018). Ελέγχει την εργασιμότητα σε ένα ΑΣΣ και εξασφαλίζει μία σταθερή περιεκτικότητα στο μίγμα, προσφέροντας παράλληλα κάποια αντίσταση σε διαχωρισμό των υλικών (Özcan & Emin Κορ, 2018; Guidelines, 2002). Κατά την προσθήκη του στο μίγμα του ΑΣΚ, ο υπερρευστοποιητής όντας μία πολυμερική, αρνητικά φορτισμένη, χημική ουσία, ενώνεται με τις θετικά φορτισμένες χημικές ουσίες που βρίσκονται κοντά του. Σκοπός του είναι η αύξηση των διαμοριακών αποστάσεων μεταξύ των κόκκων του μίγματος, προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη εργασιμότητα. Εάν οι κόκκοι των συστατικών του νωπού κονιάματος χαρακτηρίζονται από αυξημένη ειδική επιφάνεια, δηλαδή αποτελούν λεπτόκοκκα υλικά, οι διαμοριακές τους αποστάσεις ελαττώνονται με αποτέλεσμα να δημιουργείται καλύτερη επαφή μεταξύ των κόκκων, κι άρα να απαιτείται *μεγαλύτερη ποσότητα υπερρευστοποιητή*, προκειμένου οι κόκκοι να απομακρυνθούν (de Matos et al, 2020; A. Lozano-Lunar et al, 2019a). Το αντίθετο ζητούμενο εντοπίζεται στην περίπτωση που το νωπό κονίαμα περιέχει ασβεστόλιθο ως πληρωτικό υλικό το οποίο όταν προστίθεται στο νερό, διασπάται ο περιεχόμενος ασβεστίτης σε Ca²⁺ και σε CO₃⁻. Τα κατιόντα ασβεστίου ενώνονται με τα υδροξυλιόντα, OH⁻, που βρίσκονται στο διάλυμα των πόρων, με αποτέλεσμα το διάλυμα που δημιουργείται να περιέχει περισσότερα ανιόντα και άρα να έχει μεγάλη κινητικότητα. Τότε, ο υπερρευστοποιητής πρέπει να εισαχθεί στο μίγμα σε *μικρότερες ποσότητες*. Η περίπτωση που ο υπερρευστοποιητής δεν είναι συμβατός με τα πρόσθετα γίνεται αντιληπτή όταν με την προσθήκη του, το ιξώδες του μίγματος αυξάνεται. Τα κατιόντα ασβεστίου, τα οποία κυριαρχούν σε πάστα τσιμέντου Portland, ενώνονται με τον υπερρευστοποιητή και η σύνθετη πλέον πολυμερική του αλυσίδα προσανατολίζεται σύμφωνα με τη διατμητική ροή κατά την ροή της πάστας. Τα σωματίδια που έχουν προσροφηθεί στο τσιμέντο-πληρωτικό υλικό τείνουν να εμποδίσουν την ροή των μη

προσροφημένων σωματιδίων, σχηματίζοντας πολυμερικές συστάδες. Αυτές οι συστάδες εμποδίζουν τη ροή και αυξάνουν έτσι το ιξώδες του μίγματος (de Matos et al, 2020).

Ο ρόλος του *παράγοντα τροποποίησης του ιξώδους*, είναι η ελαχιστοποίηση της επίδρασης των διακυμάνσεων παραμέτρων ποσότητας και ποιότητας συστατικών, όπως η περιεκτικότητα του μίγματος σε υγρασία, η ποσότητα και το είδος των λεπτόκοκκων αδρανών, η κατανομή μεγέθους κόκκων, κοκ., με σκοπό τη δημιουργία ενός περισσότερο ανθεκτικού και εύρωστου ΑΣΣ. Στην ουσία, τροποποιεί τη συνοχή του ΑΣΣ, χωρίς να αλλοιώνει σημαντικά τη ρευστότητά του (Guidelines & Concrete, 2005), αφού έχει την ιδιότητα να απορροφάει νερό (ελεύθερο, το οποίο εμφανίζεται πριν το σημείο κορεσμού) αυξάνοντας το ιξώδες κι έτσι μειώνοντας το ρίσκο του διαχωρισμού των υλικών (Guru Jawahar et al, 2013; Guidlines, 2002). Ωστόσο, το συγκεκριμένο πρόσμικτο δεν πρέπει να θεωρείται ως τρόπος αποφυγής της ανάγκης για καλό σχεδιασμό μίγματος και προσεκτική επιλογή του συνόλου των συστατικών ενός ΑΣΣ ή ΑΣΚ.

Η Εικόνα 4 που ακολουθεί, αποτελεί μία *σύνοψη* των όσων έχουν αναλυθεί, καθώς οπτικοποιεί τις επιδράσεις που έχουν τα συστατικά υλικά ενός ΑΣΣ ή ΑΣΚ στις ρεολογικές παραμέτρους της νωπής του φάσης. Αρχικά, γίνεται σαφές ότι ένα ΑΣΣ αποκτά *χαμηλή τάση διαρροής* όταν στο μίγμα του προστεθεί υπερρευστοποιητής, νερό, περισσότερη πάστα ή συγκεκριμένα πρόσθετα, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνου (fly ash ή ggbs). Το *ιξώδες* του, ελέγχεται με την αλλαγή της περιεκτικότητας σε νερό, της ποσότητας της πάστας καθώς επίσης και με την προσθήκη ορισμένων προσθέτων, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα. Η καμπή που φαίνεται στο διάγραμμα κατά την προσθήκη υπερρευστοποιητή, γίνεται λόγω του ότι τότε, με την αύξηση της ποσότητάς του, ξεκινάει ο διαχωρισμός των υλικών. Από εκεί κι έπειτα το ιξώδες αυξάνεται καθώς τα υλικά δεν συνεργάζονται μεταξύ τους. Για τον σκοπό αυτόν προστίθενται στο μίγμα VMA με αποτέλεσμα να ελέγχεται ο διαχωρισμός. Από ένα σημείο όμως της προσθήκης του τροποποιητή ιξώδους κι έπειτα, τα αποτελέσματα είναι τα ίδια με αυτά της προσθήκης του υπερρευστοποιητή, άρα θα πρέπει να γίνει βελτιστοποίηση των συγκεκριμένων προσμίκτων, ώστε να εξασφαλισθεί ένα μίγμα ΑΣΣ σταθερό, με χαμηλή τάση διαρροής και επαρκές ιξώδες για το δεδομένο του λόγο νερού προς τσιμέντο και τη δεδομένη αναλογία συστατικών του. Λόγω της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε χονδρά αδρανή στο ΑΣΣ, το κονιάμα, που περιέχει τα λεπτά υλικά πρόσθετα, επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις ιδιότητες του ΑΣΣ από ότι τις επηρεάζει στην περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος. Δεν παρέχει μόνο την απαιτούμενη λίπανση των αδρανών όταν τα περιβάλλει, αλλά προσφέρει και την επιθυμητή χαμηλή τάση διαρροής και το επαρκές ιξώδες, προκειμένου να διασφαλιστεί η απαιτούμενη ικανότητα πλήρωσης και η διαπεραστική ικανότητα, χωρίς παρουσιαστούν φαινόμενα εμπλοκής και διαχωρισμού των συστατικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της ποσότητας των αδρανών και η αύξηση της πάστας οδηγεί σε ελάττωση της κατανάλωσης ενέργειας (η οποία κατανάλωση λαμβάνει χώρα λόγω της αύξησης της εσωτερικής τάσης του μίγματος από τις συγκρούσεις των αδρανών), διευκολύνοντας έτσι τη ροή και αποφεύγοντας το μπλοκάρισμά τους. Συνεπώς, *η επιτυχής σύνθεση του κονιάματος του ΑΣΣ, η μελέτη σύνθεσής του δηλαδή, επιβεβαιωμένη από τις πειραματικές δοκιμές της νωπής του φάσης, αποτελεί προϋπόθεση για την επιτυχή παραγωγή ΑΣΣ.* (Guru Jawahar et al, 2013)

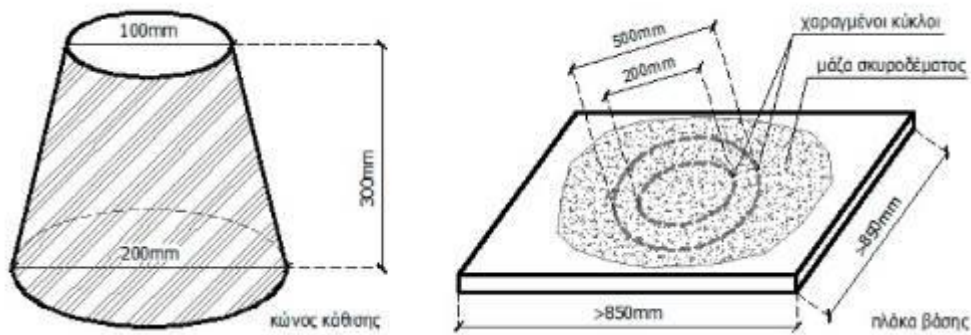


Εικόνα 4 Διαγραμματική απεικόνιση της επιρροής κάθε συστατικής ουσίας ενός ΑΣΣ ή ΑΣΚ σε συνάρτηση με τις δύο βασικές ρεολογικές παραμέτρους της νωπής του φάσης, την τάση διαρροής και το ιξώδες.

2.1.3 Εργαστηριακές Δοκιμές Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος και Κονιάματος

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να θεωρηθεί πετυχημένη μία μελέτη σύνθεσης είναι το σκυρόδεμα ή το κονίαμα που παράχθηκε μέσω αυτής, να χαρακτηρίζεται ως αυτοσυμπυκνούμενο, έπειτα από τη διεξαγωγή διάφορων *πειραματικών διαδικασιών*. Δεδομένου ότι ο συγκεκριμένος χαρακτηρισμός αυτών των σκυροδεμάτων και κονιαμάτων, σχετίζεται άμεσα με τη ρεολογία του νωπού μίγματος κάθε περίπτωσης, κρίσιμες πειραματικές διαδικασίες θεωρούνται οι δοκιμές *Εξάπλωσης* (Slump Flow) και *Χοάνης V* (V-Funnel).

Η *δοκιμή εξάπλωσης* είναι μία εύκολη και αξιόπιστη διαδικασία, η οποία πολλές φορές αποτελεί το πρώτο και το μοναδικό κριτήριο για την πιστοποίηση και τον χαρακτηρισμό ή την κατηγοριοποίηση του παραγόμενου μίγματος (Αναγνωστόπουλος, 2009). Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της *ελεύθερης οριζόντιας ροής του ΑΣΣ* απουσία εμποδίων (ανεμπόδιστη ροή) και, ειδικότερα τη *ρευστότητα* και το *ρυθμό ροής*. Πρότυπος κώνος του Abrams, ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 5, πληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία φάση, χωρίς να συμπυκνωθεί. Ο κώνος ανασηκώνεται και το σκυρόδεμα αφήνεται να ρεύσει. Η μέση τιμή των δύο διαμέτρων της τελικώς εξαπλωμένης μάζας σκυροδέματος, d_1 και d_2 , μετρούμενων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, αναφέρεται ως *εξάπλωση του σκυροδέματος* και με βάση αυτήν, το σκυρόδεμα κατατάσσεται σε τρεις κατηγορίες εξάπλωσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. (Σφήκας, 2014)



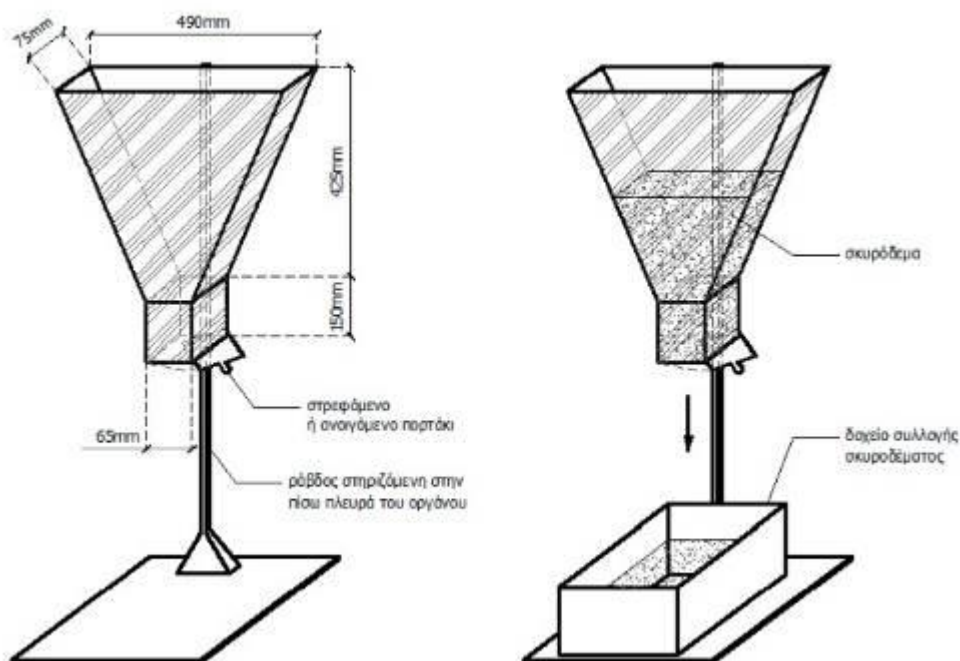
Εικόνα 5 Εξοπλισμός δοκιμής Εξάπλωσης.

Η τιμή της εξάπλωσης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 550 και 850 mm (Πίνακας 2), επιτρέπει τη σύγκριση της πλευρικής ροής και της ικανότητας πλήρωσης μιγμάτων ΑΣΣ, ενώ αποτελεί στην ουσία την αντικατάσταση της δοκιμής της κάθισης κατά το συμβατικό σκυροδέμα (Αναγνωστόπουλος, 2009). Υψηλές τιμές εξάπλωσης συνεπάγονται αφενός δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων από το σημείο έγχυσης, και αφετέρου δυνατότητα ταχύτερης πλήρωσης τύπων ή δοκιμών. Από την οπτική παρατήρηση της εξαπλωμένης μάζας, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη σταθερότητα του μίγματος, αφού παρέχονται πληροφορίες για το βαθμό εξίδρωσης του μίγματος από τη ποσότητα του νερού που βρίσκεται στην άκρη της «πίτας» του σκυροδέματος που έχει σχηματιστεί (Αναγνωστόπουλος, 2009), ενώ οι τιμές εξάπλωσης από διαδοχικές δοκιμές (δοκιμές επαναληψιμότητας, σύμφωνα με τον ορισμό που δίδεται στο πρότυπο ISO 5725-1 (1994)) δεν πρέπει να διαφέρουν περισσότερο από 50 mm. (Σφήκας, 2014)

Πίνακας 2 Κατηγορίες εξάπλωσης Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος.

Κατηγορία	Εξάπλωση (mm)
SF1	550 έως 650
SF2	660 έως 750
SF3	760 έως 850

Η δοκιμή Χοάνης V, αποτιμά την εμποδισμένη ροή του ΑΣΣ και το βαθμό στον οποίο το μίγμα είναι επιρρεπές σε έμφραξη σε θέσεις στενών ανοιγμάτων, εκτιμά δηλαδή την ικανότητα διέλευσης (διελευσιμότητα) του μίγματος διαμέσου στενών ανοιγμάτων, και συνεισφέρει στον προσδιορισμό του ιξώδους του μίγματος. Η δοκιμή πραγματοποιείται με συσκευή τύπου χοάνης, ορθογωνικής διατομής, η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 6. Το άκρο της χοάνης, καταλήγει σε θύρα εκροής. Η χοάνη, πληρώνεται με νωπό σκυροδέμα και καταγράφεται ο χρόνος εκροής, t_v (s), από τη χρονική στιγμή ανοίγματος της θύρας εκροής έως τη χρονική στιγμή που ο παρατηρητής που στέκεται άνωθεν της χοάνης δει φως στη θέση της θύρας εκροής. Στη συνέχεια, το δοχείο επαναπληρώνεται με το ίδιο υλικό και παραμένει σε ηρεμία για 5 λεπτά. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται και μετράται ο νέος χρόνος εκροής t_v 5 min. (Σφήκας, 2014)



Εικόνα 6 Εξοπλισμός δοκιμής Χοάνης V.

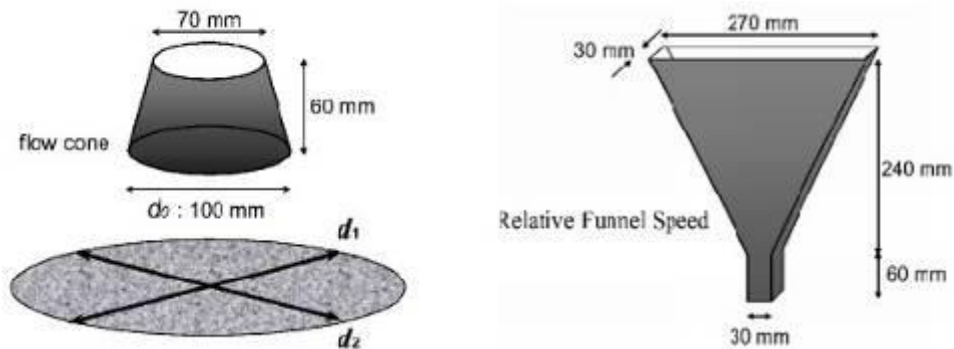
Ο χρόνος εκροής t_v (Πίνακας 3), δίνει μία εκτίμηση της ρευστότητας του μίγματος και αποτελεί ένδειξη της ικανότητας διέλευσης διαμέσου στενών ανοιγμάτων. Ειδικά για περιπτώσεις με μεγάλη περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα αδρανή, είναι πιθανό να δημιουργηθούν συνθήκες έμφραξης στο στόμιο της χοάνης. Σημαντική είναι, επίσης, η επίδραση της γωνίας της χοάνης και των διαστάσεων διατομής του στομίου, αν και η επίδραση αυτή δεν είναι επαρκώς ποσοτικοποιημένη. Η δεύτερη φάση της δοκιμής ($t_v 5 min$), δίνει μία εκτίμηση για την τάση του μίγματος να απομινύεται, δηλαδή για την στατική σταθερότητά του, αλλά εξάγονται αποτελέσματα και για τη θιξοτροπικότητα του μίγματος (βλ. Ενότητα 2.2). Συγκεκριμένα, μεγαλύτεροι χρόνοι εκροής κατά τη δεύτερη φάση της δοκιμής, υποδηλώνουν φαινόμενα απόμειξης. (Σφήκας, 2014)

Πίνακας 3 Κατηγορίες ιξώδους ΑΣΣ - Χοάνης V.

Κατηγορία	Χρόνος εκροής t_v (s)
VF1	< 9.0
VF2	9.0 έως 25.0

Σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες, πέρα από τις πειραματικές δοκιμές που αφορούν το ΑΣΣ, υπάρχουν αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές που αφορούν *Αυτοσυμπυκνούμενο Κονίαμα (ΑΣΚ)*, οι οποίες ονομάζονται *μικρή δοκιμή εξάπλωσης* (mini Slump Flow test) και *μικρή δοκιμή χοάνης V* (mini V-Funnel test). Η *μικρή δοκιμή εξάπλωσης*, προσδιορίζει στο νωπό κονίαμα ό,τι προσδιορίζει η δοκιμή εξάπλωσης στο νωπό σκυρόδεμα, δηλαδή τη *ρευστότητά* του. Ο βασικός εξοπλισμός της αποτελείται από έναν κώνο, όμοιο με τον πρότυπο κώνο του Abrams, με ύψος συνήθως 60 mm, διάμετρο βάσης περίπου 100 mm και διάμετρο κορυφής περίπου 70 mm (Εικόνα 7). Αντίστοιχα, η *μικρή δοκιμή χοάνης V*, προσδιορίζει στο νωπό κονίαμα το *ιξώδες* του, δηλαδή την αντίσταση που προβάλλει το

ρευστό μίγμα κατά τη ροή του. Ο βασικός εξοπλισμός του αποτελείται από μία συσκευή τύπου χοάνης με ύψος περίπου 240 mm, πλάτος και βάθος κορυφής περίπου 270 mm και 30 mm αντίστοιχα, και ύψος, πλάτος και βάθος του ακροφυσίου περίπου 30 mm, 60 mm και 30 mm αντίστοιχα (Εικόνα 7). Για τιμές διαμέτρου εξάπλωσης του κονιάματος, κατά τη μικρή δοκιμή εξάπλωση, 240 mm – 260 mm, και για τιμές χρόνου εκκένωσης της χοάνης V, κατά τη μικρή δοκιμή χοάνης V, 7 s – 11 s, το κονίαμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως αυτοσυμπυκνούμενο. Τέλος, υπάρχει μία ακόμα διαδεδομένη δοκιμή που αφορά ΑΣΚ που ονομάζεται *δοκιμή κώνου Marsh* (Marsh cone) και αποτιμά τη *ρευστότητα* (flowability) της πάστας του κονιάματος. Η συγκεκριμένη δοκιμή, είναι παρόμοια με αυτή της χοάνης V, αφού εξοπλισμό της αποτελεί μία χοάνη κυκλικής (κι όχι ορθογωνικής) διατομής. (Guidelines & Concrete, 2005)



Εικόνα 7 Εξοπλισμοί για τις δοκιμές μικρή δοκιμή εξάπλωσης και μικρή δοκιμή χοάνης V. (Okamura, 2003)

Τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών ΑΣΚ που περιγράφηκαν παραπάνω, πέρα από την αξιολόγηση των υλικών του ΑΣΚ σχετικά με το αν προσδίδουν στο μίγμα χαρακτηριστικά αυτοσυμπυκνωσιμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με σκοπό να προσδιοριστούν οι ρεολογικές ιδιότητες του ίδιου μίγματος. Από τα αποτελέσματα της *μικρής δοκιμής εξάπλωσης*, d_1 και d_2 , υπολογίζεται ο συντελεστής Γ_m σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\Gamma_m = (d_1 d_2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (2.1.a)$$

όπου:

d_1 και d_2 : οι δύο διαμέτροι της τελικώς εξαπλωμένης μάζας σκυροδέματος, μετρούμενες σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7, και

d_0 : η διάμετρος της βάσης του κώνου εξάπλωσης, όπως επίσης φαίνεται στην Εικόνα 7.

Από τα αποτελέσματα της *μικρής δοκιμής χοάνης V*, t_V , υπολογίζεται ο συντελεστής R_m σύμφωνα με της ακόλουθη σχέση:

$$R_m = 10 / t_V \quad (2.1.b)$$

όπου:

t_V (sec): ο χρόνος από τη χρονική στιγμή ανοίγματος της θύρας εκροής έως τη χρονική στιγμή που ο παρατηρητής που στέκεται άνωθεν της χοάνης δει φως στη θέση της θύρας εκροής.

Ο συντελεστής Γ_m , αντιστοιχεί στην παραμορφωσιμότητα του μίγματος, δηλαδή στις εσωτερικές αναπτυσσόμενες *διατμητικές τάσεις*, ενώ ο συντελεστής R_m , αντιστοιχεί στο *ιξώδες* του ρευστού κονιάματος. Όσο ο συντελεστής Γ_m αυξάνεται, αυξάνεται και η παραμορφωσιμότητα του ρευστού, ενώ όσο ο συντελεστής R_m μειώνεται, αυξάνεται το *ιξώδες* του ρευστού. Αυτό συμβαίνει καθώς όσο πιο εύκολα παραμορφώνεται ένα ρευστό, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος εξάπλωσής του, ενώ όσο δυσκολότερα ρέει, τόσο περισσότερο χρόνο απαιτεί προκειμένου να εξέλθει από μία οπή. (Felekoğlu et al, 2006; Okamura & Ouchi, 2003)

2.2 Ρεολογία Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (rheology)

2.2.1 Ρεολογία και κατηγορίες Ρευστών

Με τον όρο *Ρεολογία*, περιγράφεται ο επιστημονικός κλάδος της Μηχανικής ο οποίος μελετά τη *ροή* και την *παραμόρφωση* της ύλης όταν αυτή βρίσκεται *υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων*, χαρακτηριστικά τα οποία προσδίδονται σε ένα ρευστό υλικό λόγω της εσωτερικής του δομής και της συμπεριφοράς που εκδηλώνει κατά τη ροή του. Ο όρος της ρεολογίας, αποδίδεται στον Αμερικανό Καθηγητή του Πανεπιστημίου του Lehigh, *Eugene C. Bingham*, και είναι εμπνευσμένος από την φράση του Ηράκλειτου: «*Τὰ πάντα ρεῖ*». (Διαμαντώνης, 2008; Μακρής και Σμαργιαννάκη, 2012)

Ο όρος της *Ρευστότητας*, περιγράφει την ικανότητα των υλικών να ρέουν (flowability), και αναφέρεται σε δύο ιδιότητές τους: στην *παραμορφωσιμότητα* (deformability), που εξαρτάται από την *αναπτυσσόμενη τάση διαρροής* του ρευστού υλικού και δείχνει την τελική αυθόρμητη εξάπλωσή του, και στο *ιξώδες* (viscosity) που δείχνει τον ρυθμό κίνησης ροής. Οι δύο ιδιότητες αυτές, αποτελούν τις βασικές παραμέτρους της επιστήμης της Ρεολογίας. (Μακρής και Σμαργιαννάκη, 2012; Los, 2020)

Το *ιξώδες*, είναι το μέτρο της εσωτερικής τριβής ενός ρευστού, ή, με διαφορετικά λόγια, το *μέτρο αντίστασης του ρευστού υλικού στην επιβαλλόμενη παραμόρφωσή του*. Η εσωτερική τριβή σε ένα ρευστό, εμφανίζεται όταν ένα στρώμα-τμήμα του εξωθείται σε σχετική κίνηση ως προς ένα άλλο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τριβή, τόσο μεγαλύτερη δύναμη απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η κίνηση, και άρα τόσο μεγαλύτερο και το *ιξώδες* του. Η δύναμη αυτή ονομάζεται *διατμητική δύναμη* και συμβαίνει οποτεδήποτε το ρευστό κινείται ή διανέμεται, όπως στην *έγχυση*, την *εξάπλωση*, την *εκνέφωση*, την *ανάμιξη* κ.ά. (Διαμαντώνης, 2008).

Σύμφωνα με τον Isaac Newton, η διατμητική δύναμη είναι ανάλογη με τη διαφορά των ταχυτήτων δύο διαδοχικών στρωμάτων του κινούμενου ρευστού, η οποία διαιρεμένη με την απόσταση μεταξύ των επιφανειών των δύο αυτών στρωμάτων καλείται *βαθμίδα ταχυτήτων*. Η συγκεκριμένη αναλογία περιγράφεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dV}{dx} \quad (2.2)$$

όπου:

F : η διατμητική δύναμη,

A : η επίπεδη επιφάνεια των στρωμάτων του ρευστού,

η : το *ιξώδες*,

dV : η σχετική ταχύτητα των στρωμάτων του ρευστού,

dx : η απόσταση των επιφανειών των δύο διαδοχικών στρωμάτων του ρευστού.

Η *βαθμίδα ταχυτήτων*, dV/dx , εφόσον αποτελεί το μέτρο μεταβολής της ταχύτητας με την οποία τα στρώματα εκτελούν σχετική κίνηση με τα υπόλοιπα γειτονικά λόγω της

διατμητικής δύναμης που ασκείται σε αυτά, καλείται και ως *ρυθμός διάτμησης*, $\dot{\gamma}$. Ο όρος F/A , εφόσον περιγράφει τη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που απαιτείται προκειμένου να εφαρμοστεί τελικά στο ρευστό η διατμητική δύναμη, καλείται ως *διατμητική τάση*, τ . Επομένως η σχέση (2.2) επαναδιατυπώνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση, δίδοντας ένα μαθηματικό ορισμό για το ιξώδες:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \quad \text{ιξώδες} = \frac{\text{διατμητική τάση}}{\text{ρυθμός διάτμησης}} \quad (2.3)$$

Εάν για κάποιο ρευστό, κατασκευαστεί το διάγραμμα της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης ως προς τον αναπτυσσόμενο ρυθμό διάτμησης και προκύψει μία ευθεία γραμμή, με σταθερή δηλαδή κλίση (κι επομένως σταθερό ιξώδες, σύμφωνα με την σχέση (2.3)), η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων, τότε το ρευστό αυτό λέγεται *Νευτώνειο* και υπακούει στους νόμους της Κλασσικής Μηχανικής των ρευστών. Κάποια παραδείγματα Νευτώνειων ρευστών είναι ο αέρας, το νερό, το βενζόλιο και γενικά όλα τα αέρια και τα διαλύματα και οι ουσίες με μικρή σχετική μοριακή μάζα. Τα περισσότερα ρευστά όμως που υπάρχουν στη φύση ή που παρασκευάζονται από τους ανθρώπους, δεν παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά κατά τη ροή και παραμόρφωσή τους. Τα ρευστά αυτά καλούνται *Μη-Νευτώνεια* ρευστά και η κλίση της καμπύλης της διατμητικής τους τάσης ως προς το ρυθμό διάτμησης τους μεταβάλλεται με τις αλλαγές του ρυθμού διάτμησης. Μη-Νευτώνεια ρευστά είναι τα υγρά υψηλού μοριακού βάρους, που περιέχουν διαλύματα ή τήγματα πολυμερών, όπως και υγρά τα οποία περιέχουν αιωρούμενα σωματίδια. Το αντικείμενο της ρεολογίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς τέτοιων ρευστών. (Διαμαντώνης, 2008)

Τα *Μη-Νευτώνεια ρευστά*, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα Μη-Νευτώνεια ρευστά που μπορεί να είναι *ανεξάρτητα από τον χρόνο*, και στα Μη-Νευτώνεια ρευστά που μπορεί να είναι *εξαρτημένα από τον χρόνο*. Η πρώτη κατηγορία, που θέλει το χρόνο να *μην επηρεάζει* τη συμπεριφορά των ρευστών υλικών υπό την επιβολή διατμητικών δυνάμεων, περιλαμβάνει τα ακόλουθα είδη ρευστών (Μαάιτα, 2018):

1. *Ψευδοπλαστικά ρευστά*: Το φαινόμενο ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Τέτοια ρευστά είναι το αίμα, οι χυμοί φρούτων, οι φυσικές κόλλες κοκ.
2. *Διασταλτικά ρευστά*: Το φαινόμενο ιξώδες αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης. Τέτοια ρευστά είναι συνήθως πυκνά αιωρήματα στερεών, όπως είναι οι αμυλούχες κόλλες κοκ.
3. *Πλαστικά ρευστά*: τα ρευστά που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία, ρέουν μόνο όταν η εφαρμοζόμενη σε αυτά διατμητική τάση υπερβεί την τάση διαρροής του ρευστού. Τέτοια ρευστά είναι οι οδοντόκρεμες, το μέλι, οι ζελατίνες κοκ.

Η επόμενη κατηγορία, που θέλει τον χρόνο να *επηρεάζει* τη συμπεριφορά των ρευστών υλικών υπό την επιβολή διατμητικών δυνάμεων, περιλαμβάνει τα ακόλουθα είδη ρευστών (Μαάιτα, 2018):

1. *Θιξοτροπικά ρευστά*: Το φαινόμενο ιξώδες μειώνεται με το χρόνο όταν υφίστανται διάτμηση με σταθερό ρυθμό. Τέτοια ρευστά είναι τα χρώματα για βαφή επιφανειών. Το συγκεκριμένο υλικό, όταν βρίσκεται στο κουτί του παρουσιάζει μεγάλο ιξώδες ώστε να μην διαχωρίζονται τα πιγμέντα από το μίγμα, αλλά όταν ανακατεύεται ελαττώνεται το ιξώδες ώστε να γίνεται πιο λεπτόρευστο για να απλώνεται εύκολα. Αμέσως μετά τη χρήση του, ξαναγίνεται παχύρευστο και συγκρατείται πάνω στη βαμμένη επιφάνεια ώστε το βάψιμο να παραμένει ομοιόμορφο. (ένα θιξοτροπικό μίγμα αναπτύσσει γρήγορα εσωτερική

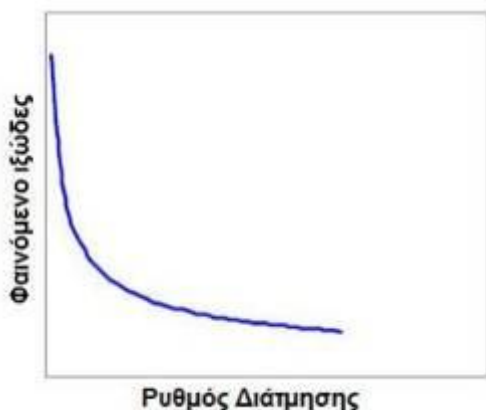
δομή και επομένως θα εμφανίσει και αυξημένο χρόνο εκκένωσης).
(Αναγνωστόπουλος, 2009)

2. *Ρεοπηκτικά ρευστά*: Το φαινόμενο ιξώδες τους αυξάνεται με τον χρόνο όταν υφίσταται διάτμηση με σταθερό ρυθμό. Τέτοια ρευστά είναι για παράδειγμα, πυκνά διαλύματα ενυδρού γύψου, και έχουν σπάνια εφαρμογή.

Μία τελευταία κατηγορία Μη-Νευτώνειων ρευστών, αποτελούν τα *ιξωδοελαστικά ρευστά*. Τα συγκεκριμένα ρευστά εμφανίζουν συμπεριφορά τόσο ανάλογη στερεού (π.χ. ελαστικότητα) όσο και ρευστού. Κάθε υφιστάμενη τάση δεν αποτελεί μόνο συνάρτηση της εκάστοτε καταπόνησης, αλλά εξαρτάται και από την όλη προϊστορία του καταπονημένου υλικού⁷. Τέτοια ρευστά είναι το ασπάρδι του αυγού, η πίσσα, ο υγρός στόκος κοκ. (Μαΐτα, 2018)

Προκειμένου να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι κατηγορίες των χρονικά ανεξάρτητων Μη-Νευτώνειων ρευστών, γίνεται στη συνέχεια περιγραφή της κίνησής τους.

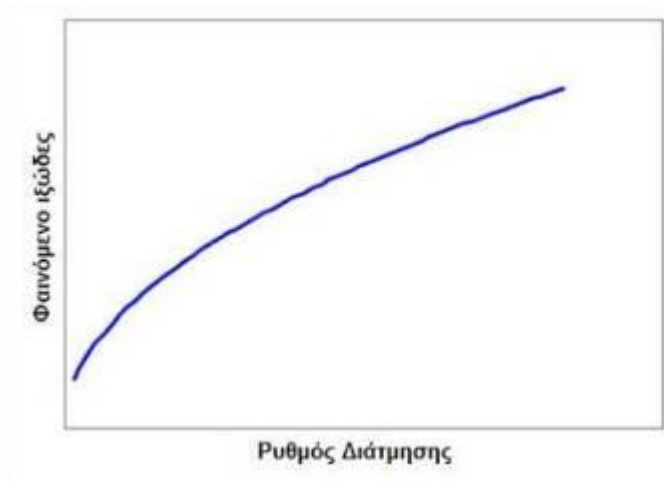
Ένα ρευστό ονομάζεται *ψευδοπλαστικό* όταν η διαφορά ταχυτήτων των στρωμάτων μέσα στο ρευστό (ρυθμός διάτμησης) αυξάνεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η δύναμη που απαιτείται (διατμητική τάση) για να πραγματοποιηθεί η κίνηση του στρώματος του ρευστού που εξωθείται σε σχετική κίνηση ως προς ένα άλλο. Το αντίθετο ισχύει για τα *διασταλτικά* ρευστά. Με τη ροή του ρευστού, αναπτύσσεται μεγάλη εσωτερική τριβή, που σημαίνει ότι όσο πιο γρήγορα ρέει το υλικό, τόσο πιο δύσκολα πραγματοποιείται η ροή του. Τα χαρακτηριστικά αυτά παριστάνονται στις Εικόνα 8 και Εικόνα 9. Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλά ψευδοπλαστικά ρευστά, δύνανται να επιδείξουν συμπεριφορά Νευτώνειων ρευστών όταν ο ρυθμός διάτμησης λαμβάνει ακραίες τιμές, είτε χαμηλές είτε υψηλές. Επιπλέον, τα περισσότερα διασταλτικά ρευστά, σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης, τείνουν να ακολουθούν τη συμπεριφορά των ψευδοπλαστικών ρευστών. (Διαμαντώνης, 2008)



Εικόνα 8 Φαινόμενο ιξώδες συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης στα ψευδοπλαστικά ρευστά.

⁷ Πηγή πληροφοριών

[Σύλλογος Χημικών Μηχανικών Μαγνησίας: Ιξωδοελαστικά Ρευστά \(psxmmagn.blogspot.com\)](http://psxmmagn.blogspot.com)



Εικόνα 9 Φαινόμενο ιξώδες συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης στα διασταλτικά ρευστά.

Τα πλαστικά ρευστά ονομάζονται εναλλακτικά *ρευστά τύπου Bingham* και αποτελούν επί της ουσίας ρευστά τα οποία όσο η επιβαλλόμενη διατμητική τους τάση κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές, δεν ρέουν, αφού η τάση αυτή πρέπει να υπερπηδήσει την κρίσιμη τιμή της, η οποία εξαρτάται από τη φύση του ρευστού. Η κρίσιμη τιμή είναι η τάση διαρροής και αντιστοιχεί στην ελάχιστη απαιτούμενη διατμητική τάση για την εκκίνηση της ροής. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, το υλικό συμπεριφέρεται ως Νευτώνειο ρευστό, αφού η καμπύλη της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης ως προς τον αναπτυσσόμενο ρυθμό διάτμησης αποτελεί μία ευθεία γραμμή, στην περίπτωση του ιδανικού πλαστικού ρευστού, με αποτέμνουσα το σημείο $(0, \tau_0)$ και κλίση το *πλαστικό ιξώδες*, μ_p , (η σταθερή αναλογία μεταξύ διατμητικής τάσης και ρυθμού διάτμησης). Με άλλα λόγια, τα πλαστικά ρευστά σε κατάσταση ηρεμίας έχουν μια συγκεκριμένη τρισδιάστατη ελαστική δομή, η οποία είναι ανθεκτική στην επίδραση μικρών διατμητικών τάσεων. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ρευστό αυτό, με διατμητικές τάσεις μικρότερες του τ_0 , θα συμπεριφέρεται περίπου ως στερεό, ενώ με μεγαλύτερες τιμές αυτής θα περνάει στην περιοχή των *υγρών*. (Διαμαντώνης, 2008; Μακρής και Σμαργιαννάκης, 2012)

Τα χαρακτηριστικά αυτά, παρουσιάζονται στην Εικόνα 10 που ακολουθεί, ενώ μαθηματικά τα ρευστά τύπου Bingham περιγράφονται από τη σχέση:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

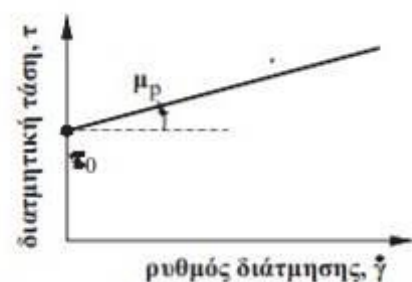
όπου:

τ : η διατμητική τάση,

τ_0 : η τάση διαρροής που αντιστοιχεί στην ελάχιστη διατμητική τάση που απαιτείται για την έναρξη της ροής,

μ_p : το πλαστικό ιξώδες που αντιστοιχεί στην αντίσταση του υλικού να υποστεί μία δεδομένη ροή,

$\dot{\gamma}$: ο ρυθμός διάτμησης.



Εικόνα 10 Ρεολογικό μοντέλο Bingham, πλαστικών ρευστών.

2.2.2 Το νωπό Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα ως ρευστό

Εφόσον το σκυρόδεμα ως υλικό, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, έχει τη δυνατότητα να ρέει υπό την εξωτερική επιβολή τάσεων, λόγω της βαρύτητας που του ασκείται από τη Γη ή λόγω της άντλησής του, ανήκει στην κατηγορία των ρευστών. Η *ρευστότητα*, ή αλλιώς και πλαστικότητα (fluidity, plasticity) του σκυροδέματος, αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνοχής του, στην αντίσταση που παρουσιάζει σε αλλαγές σχήματος του όγκου του ή στην ευκολία που διαθέτει να μορφοποιείται στον ξυλότυπο. Συνεπώς η έγχυση, η εξάπλωση, η άντληση και η συμπύκνωση κάθε είδους σκυροδέματος εξαρτάται από τη ρεολογία του. Το ΑΣΣ, το οποίο βασίζεται στις *ιδιότητες του κονιάματος* (βλ. Ενότητα 2.2.1) αλλά και στην *εσωτερική τριβή των αδρανών*, όσον αφορά στη νωπή του συμπεριφορά, συνδυάζει ρεολογικά αντίθετα χαρακτηριστικά. Κατά τη ροή του, αναπτύσσει χαμηλή διατμητική τάση και παράλληλα χαρακτηρίζεται από επαρκές ιξώδες. Η ανάπτυξη *χαμηλών διατμητικών τάσεων*, αυξάνει την ικανότητα παραμόρφωσης του υλικού, ενώ το *επαρκές ιξώδες* διατηρεί ομογενοποιημένο το μίγμα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του. (Αναγνωστόπουλος, 2009; Διαμαντώνης, 2008; Μακρής και Σμαργιανακη, 2012; Boukhelkhal et al, 2017)

Πιο αναλυτικά, αναφορικά με τις *ιδιότητες του κονιάματος*, για την επίτευξη των ιδιοτήτων του ΑΣΣ, όπως είναι η αντίσταση σε απόμιξη αλλά και η αποφυγή φαινομένων εμπλοκής και διαχωρισμού αδρανών, καθίσταται απαραίτητη η μείωση του ποσοστού των χονδρόκοκκων αδρανών κατά τη σύνθεσή του και η σωστή επιλογή των υπόλοιπων συστατικών υλικών. Ο επιτυχής σχεδιασμός ΑΣΣ, συνθέτει ένα ΑΣΚ το οποίο χαρακτηρίζεται από την απαραίτητη ρευστότητα και το απαραίτητο ιξώδες, έτσι ώστε να αποφεύγεται η παρεμπόδιση της ροής όταν το υλικό βρίσκεται υπό κίνηση ανάμεσα από τον οπλισμό σε έναν ξυλότυπο. Συγκεκριμένα, όταν το σκυρόδεμα παραμορφώνεται, δηλαδή όταν ρέει, η πάστα με υψηλό ιξώδες αποτρέπει την αύξηση της εσωτερικής διατμητικής τάσης. Η ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων προσθέτων, κρατώντας χαμηλό τον λόγο νερού προς τσιμέντο του μίγματος, σε συνεργασία με τη δράση του υπερρευστοποιητή, δίνουν το αποτέλεσμα που έχει σχεδιαστεί τόσο σε επίπεδα παραμορφωσιμότητας όσο και σε επίπεδα ιξώδους. Αυτό συμβαίνει καθώς η τσιμεντόπαστα έχει το ρόλο του λιπαντικού μέσου με το οποίο μπορούν οι κόκκοι του υλικού να κυλούν μεταξύ τους, μειώνοντας τις εσωτερικές τριβές κι αυξάνοντας έτσι τη ρευστότητα του μίγματος. Εξηγείται με αυτόν τον τρόπο η διαφοροποίηση που εμφανίζεται μεταξύ των συνθέσεων ΑΣΣ και συμβατικού σκυροδέματος, όσον αφορά την αναγκαιότητα των υλικών και των προσθέτων που χρησιμοποιούνται. (Αναγνωστόπουλος, 2009)

Το πρόβλημα της εμπλοκής των αδρανών, ιδιαίτερα κοντά σε εμπόδια και σε στενά ανοίγματα, πηγάζει από την *εσωτερική τριβή* τους, που αναπτύσσεται κατά τη ροή του

μίγματος λόγω της παραμόρφωσής του. Όταν τα διαστήματα από τα οποία πρέπει να περάσει το μίγμα είναι πολύ μικρά και ο όγκος των αδρανών είναι πολύ μεγάλος, η ενέργεια που απαιτείται για τη ροή καταναλώνεται εξ ολοκλήρου από τις αυξανόμενες εσωτερικές τάσεις, με συνέπεια να παρεμποδίζεται η κίνηση. Για να μειωθεί η τριβή μεταξύ των σωματιδίων των αδρανών, είναι απαραίτητο να μειωθεί η πιθανότητα της επαφής μεταξύ τους. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό, είναι να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ των αδρανών, είτε με τη μείωση της ποσότητάς τους, είτε αυξάνοντας τον περιεχόμενο τσιμεντοπολτό. Στην περίπτωση των κονιών, η αύξηση της ποσότητας του νερού στο κονίαμα δεν αποτελεί τη λύση. Από μόνο του το κονίαμα, πρέπει να έχει εξαιρετική ικανότητα παραμόρφωσης, χαρακτηριστικό που απαιτεί διασπορά των λεπτόκοκκων υλικών με χρήση υπερρευστοποιητών. Η χρήση υπερβολικά υψηλού ποσοστού νερού, οδηγεί σε απόμιξη και ανεπιθύμητη συμπεριφορά σκληρυμένου σκυροδέματος. Επομένως, είναι πιο αποτελεσματικό να μην αυξηθεί η ικανότητα παραμόρφωσης του τσιμεντοπολτού, και κατά συνέπεια του σκυροδέματος, αλλά να αυξηθεί το ιξώδες του. (Αναγνωστόπουλος, 2009)

Προκειμένου να γίνει περισσότερο κατανοητή η συμπεριφορά του ΑΣΣ και του ΑΣΚ κατά τη ροή τους, είναι ανάγκη να λάβει χώρα μια πιο θεμελιώδης και ποσοτική περιγραφή της ροής του σκυροδέματος, να οριστεί δηλαδή το ρεολογικό μοντέλο που το περιγράφει. Το 1983, οι Tattersall και Banfill κατέταξαν το σκυρόδεμα στην κατηγορία των *ρευστών Bingham*. Η δοκιμή που πραγματοποίησαν προκειμένου να εξαχθεί αυτό το συμπέρασμα είναι γνωστή ως «δοκιμή δύο σημείων» (“*two point test*”), και αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Sheffield τη δεκαετία των '70. Τα ρευστά τύπου Bingham, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ονομάζονται διαφορετικά ως πλαστικά ρευστά και ρέουν μόνο όταν ασκείται σε αυτά μία τάση μεγαλύτερη από την χαρακτηριστική (για κάθε ρευστο που ανήκει σε αυτήν την κατηγορία) τάση διαρροής. Στην περίπτωση του νωπού ΑΣΣ, η σωστή προσομοίωσή του με βάση το συγκεκριμένο ρεολογικό μοντέλο, λαμβάνει χώρα όταν η *τάση διαρροής* του βρίσκεται κοντά στο μηδέν. Αυτό συμβαίνει καθώς το συγκεκριμένο είδος σκυροδέματος, εξαπλώνεται και καλύπτει τις θέσεις που πρέπει να καλύψει μόνο υπό την επίδραση του ίδιου βάρους του. Η τάση διαρροής, μετρίεται στα ρευστά υλικά με τη βοήθεια του *Ρεόμετρου*. Η συσκευή αυτή, καθορίζει και ρυθμίζει τη διατμητική τάση που χρειάζεται το σκυρόδεμα, για διάφορες τιμές ρυθμού διάτμησης, προκειμένου να ξεκινήσει να ρέει. Η σχέση που προκύπτει μετά από τη δοκιμή του ρεομέτρου μεταξύ της διατμητικής τάσης του ρευστού και του ρυθμού διάτμησης του, μπορεί να περιγραφεί από το ρεολογικό μοντέλο των ρευστών Bingham. (Rasekh et al, 2019)

Μία σημαντική παρατήρηση που επισημαίνεται στο σημείο αυτό, είναι ότι η ρεολογική συμπεριφορά του ΑΣΣ που έχει περιγραφεί έως το σημείο αυτό, αφορά νωπό ΑΣΣ, το οποίο έχει μόλις δημιουργηθεί, δηλαδή τα συστατικά του έχουν μόλις αναμειχθεί πλήρως. Με την πάροδο του χρόνου, λόγω της φύσης του μίγματος αλλά και των αντιδράσεων ενυδάτωσης που λαμβάνουν χώρα σε αυτό, το ιξώδες του μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χαρακτηριστεί το νωπό σκυρόδεμα καθαρά ως ρευστό Bingham. Όταν το σκυρόδεμα είναι ακόμα στη *νωπή του κατάσταση*, δηλαδή όταν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης έχουν ξεκινήσει μόλις να πραγματοποιούνται, το ρευστό σκυρόδεμα μπορεί να χαρακτηριστεί και ως *θιξοτροπικό ρευστό*, δηλαδή ως ρευστό του οποίου το ιξώδες μειώνεται υπό την επιβολή σταθερής διατμητικής τάσης (βλ. Ενότητα 2.2.1). Η αύξηση της ρευστότητας του σκυροδέματος τείνει να μειώσει την θιξοτροπία του μίγματος, επομένως το νωπό ΑΣΣ παρουσιάζει μειωμένα θιξοτροπικά χαρακτηριστικά (Αναγνωστόπουλος, 2009). Πληθώρα επιστημόνων υποστηρίζουν ότι τα μίγματα που έχουν ως βάση το τσιμέντο, παρουσιάζουν και ψευδοπλαστική συμπεριφορά αφού με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης, το ιξώδες τους ελαττώνεται, με αποτέλεσμα να κατατάσσουν το νωπό ΑΣΚ στα ψευδοπλαστικά ρευστά (Bouvet et al, 2010; Bouziani & Benmounah, 2013). Τέλος, ορισμένες

βιβλιογραφικές αναφορές, υποστηρίζουν πως το νωπό ΑΣΚ μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια από το μοντέλο *Herschel-Bulkley*, το οποίο μοιάζει αρκετά με το ρεολογικό μοντέλο Bingham, και περιγράφεται από την σχέση:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}^n \quad (2.5)$$

όπου:

τ : η διατμητική τάση,

τ_0 : η τάση διαρροής που αντιστοιχεί στην ελάχιστη διατμητική τάση που απαιτείται για την έναρξη της ροής,

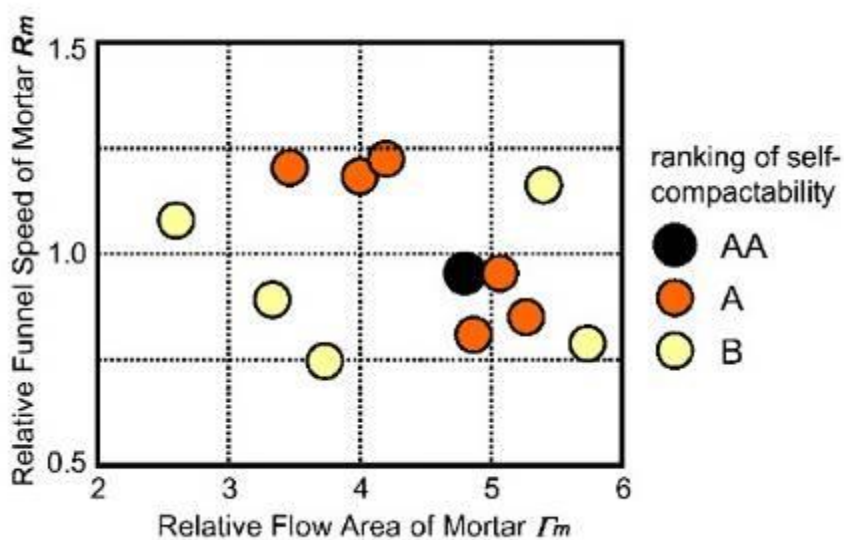
μ : το πλαστικό ιξώδες που αντιστοιχεί στην αντίσταση του υλικού να υποστεί μία δεδομένη ροή,

$\dot{\gamma}$: ο ρυθμός διάτμησης, και

n : μία παράμετρος του υλικού η οποία φανερώνει τον βαθμό αραίωσης του υγρού, δηλαδή την τάση που έχει το ιξώδες να μεταβάλλεται κατά τη ροή του ρευστού (για $n > 1$, το ρευστό έχει διασταλτικές ιδιότητες, ενώ για το $n < 1$ χαρακτηρίζεται από ψευδοπλαστικές). (Bouvet et al, 2010)

2.2.3 Ειδικά Ρεολογικά Μοντέλα Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος και Κονιάματος

Υποθέτοντας ότι η ρεολογία του κονιάματος του σκυροδέματος ορίζεται από το ρεολογικό μοντέλο που ακολουθούν τα ρευστά *Bingham*, τα αποτελέσματα της πειραματικής μικρής δοκιμής της εξάπλωσης, δηλαδή η μέση διάμετρος εξάπλωσης, μπορούν να συσχετισθούν με την τάση διαρροής του νωπού σκυροδέματος, και ο χρόνος ροής που προκύπτει από τη μικρή δοκιμή της χοάνης V μπορεί να συσχετισθεί με το πλαστικό ιξώδες (Felekoğlu et al, 2006). Διάφορες μέθοδοι, χρησιμοποιούν τους συντελεστές Γ_m και R_m των συγκεκριμένων πειραματικών διαδικασιών προκειμένου να χαρακτηρίσουν το κάθε μίγμα κονιάματος ως αυτοσυμπυκνούμενο ή όχι. Οι Okamura et al, υπολογίζοντας τους δύο αυτούς συντελεστές για ΑΣΚ, δημιούργησαν το διάγραμμα που φαίνεται στην Εικόνα 11. Σε αυτό, λαμβάνει χώρα μία κατάταξη της ποιότητας της αυτοσυμπυκνωσιμότητας του ΑΣΚ, σε συνάρτηση με τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων, μεταφρασμένα στους δύο αυτούς συντελεστές. Η μαύρη κουκίδα απεικονίζει τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το ΑΣΚ προκειμένου η αυτοσυμπυκνωσιμότητά του να θεωρείται η βέλτιστη (Okamura & Ouchi, 2003). Ωστόσο, σύμφωνα με την πρόσφατη βιβλιογραφία, τέτοιου είδους σχέσεις προέκυψε ότι χαρακτηρίζονται από χαμηλή έως ανεπαρκή συσχέτιση (correlation coefficients), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι πρέπει να αναπτυχθούν πιο εξελιγμένα και περίπλοκα ρεολογικά μοντέλα (Felekoğlu et al, 2006).



Εικόνα 11 Σχέση μεταξύ ρευστότητας κονιάματος και αυτοσυμπκνωσιμότητας νωπού σκυροδέματος.

Οι Bouziani & Benmounah, διεξάγοντας πληθώρα πειραματικών διεργασιών και στατιστικών επεξεργασιών των αποτελεσμάτων τους, δημιούργησαν ένα νομογράφημα σύμφωνα με το οποίο, για δεδομένο ιξώδες του μίγματος, υπολογίζονται η διάμετρος εξάπλωσης και ο χρόνος εκκένωσης της χοάνης V ενός ΑΣΚ. Τα μίγματα που έχουν ως βάση το τσιμέντο, μπορούν να περιγραφούν από ρεολογικά μοντέλα της μορφής:

$$\mu = a\gamma^b \quad (2.6)$$

όπου:

μ : το ιξώδες του μίγματος,

γ : η περιστροφική ταχύτητα που το επιβάλλεται κατά τη πειραματική διαδικασία της ρεομέτρησης, και

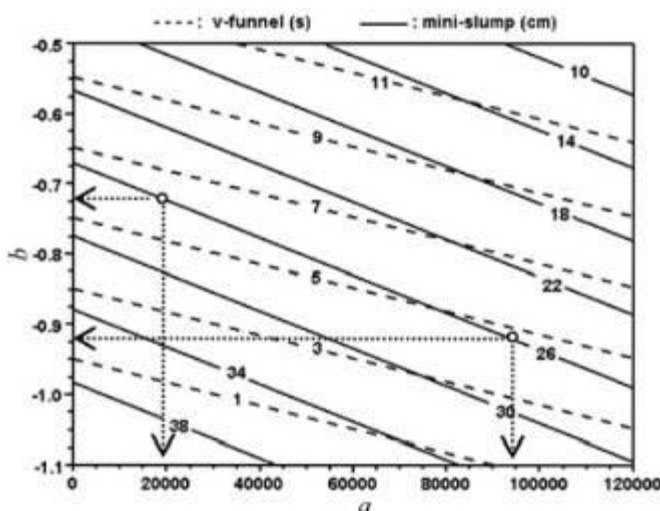
a και b : οι συντελεστές συνεκτικότητας (consistency index) και ροής (flow index) αντίστοιχα, οι οποίοι χαρακτηρίζουν το αρχικό ιξώδες του μίγματος και την απαιτούμενη ενέργεια προκειμένου το μίγμα κατά τη ροή του να έχει συνοχή (οι συγκεκριμένοι συντελεστές προκύπτουν με το πέρας της ρεομέτρησης, σύμφωνα με τη βέλτιστη προσαρμογή συνάρτησης, της μορφής της παραπάνω σχέσης, στα δεδομένα που προέκυψαν).

Εφόσον με την έναρξη της ροής του μίγματος ΑΣΚ, η διατμητική του τάση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του ρυθμού διάτμησής του (ορισμός πλαστικών ρευστών), γραμμική αναμένεται να είναι και η σχέση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών V funnel και ιξώδους, καθώς και slump flow και ιξώδους. Πράγματι, μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, οι Bouziani & Benmounah συσχέτισαν γραμμικά με επιτυχία (όσον αφορά τις ακρίβειες) τους συντελεστές που περιγράφουν το ιξώδες, a και b , με τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών ΑΣΚ, όπως φαίνεται στις σχέσεις 2.7 και 2.8:

$$V - funnel (s) = 19.9 + 0.000033a + 19.9b \quad (2.7)$$

$$mini - slump (cm) = -0.0001\alpha - 38.4b \quad (2.8)$$

Το νομογράφημα που προέρχεται από τις συγκεκριμένες σχέσεις φαίνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12 Νομογράφημα συσχέτισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών εξάπλωσης και χοάνης V, με τους συντελεστές συνεκτικότητας (α) και ροής (b) (Bouziyani & Benmounah, 2013).

Οι Bouvet et al, σε μία προσπάθειά τους να δημιουργήσουν ένα πιο γενικό και όχι ευαίσθητο στις αλλαγές, μοντέλο που να επιτρέπει την πρόβλεψη των τάσεων διαρροής στο νωπό ΑΣΚ χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα που προέρχονται από εμπειρικές δοκιμές και αριθμητικές προσομοιώσεις, κατέγραψαν στην εργασία τους διάφορα αναλυτικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τον ίδιο σκοπό. Το πρώτο μοντέλο δημιουργήθηκε από τους Okado et al, και συσχετίζει την τάση διαρροής με τον όγκο του κώνου της μικρής δοκιμής εξάπλωσης, V_c , και την τελική διάμετρο του εξαπλωμένου κονιάματος, D_f . Βασίζεται στην υπόθεση ότι το κονίαμα ρέει μόνο υπό την επίδραση του ίδιου βάρους του, και έχει ως εξής:

$$\tau_0 = \frac{225g\rho V_c^2}{4\pi^2 D_f^5} \quad (2.9)$$

όπου:

τ_0 : το όριο διαρροής του νωπού ΑΣΚ, μιας και θεωρείται ως ρευστό Bingham ή Herchel-Bulkley,

g : ο συντελεστής βαρύτητας,

ρ : η πυκνότητα του νωπού κονιάματος,

V_c : ο όγκος του κώνου εξάπλωσης, και

D_f : η τελική διάμετρος εξάπλωσης.

Ένα άλλο μοντέλο, δημιουργήθηκε από τους Roussel et al, και αποτελεί βελτίωση του προηγούμενου ρεολογικού μοντέλου, μιας και το πρώτο δε δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά τις χαμηλού μεγέθους διατμητικές τάσεις που υπάρχουν στα ΑΣΚ και ΑΣΣ. Το συγκεκριμένο μοντέλο εισάγει την έννοια της επιφανειακής τάσης και είναι:

$$\tau_0 = \frac{1}{4} \frac{D_f^2}{V_c} \left(\frac{225g\rho V_c^3}{\pi^2 D_f^7} - \lambda \right) \quad (2.10)$$

όπου:

λ : συντελεστής συνάρτησης (coefficient function) τόσο της άγνωστης επιφανειακής τάσης του ρευστού, όσο και της γωνίας επαφής.

Τέλος, οι Tregger et al πρότειναν ένα διαφορετικό ρεολογικό μοντέλο που περιγράφεται από τη σχέση μεταξύ της μετρηθείσας τάσης διαρροής, τ_0 , από ένα ομόκεντρο κυλινδρικό ροόμετρο (concentric cylinder rheometer), και της τελικής διαμέτρου της εξάπλωμένης πάστας, D_f :

$$\tau_0 = \frac{2.75 * 10^{-9}}{D_f^{5.81}} \quad (2.11)$$

Το ρεολογικό τους μοντέλο όμως, προβλέπει και το πλαστικό ιξώδες, μ_0 ενός νωπού ΑΣΚ, εφόσον είναι γνωστός ο χρόνος, T_f , που απαιτείται προκειμένου να ολοκληρωθεί η εξάπλωση:

$$\mu_0 = \tau_0(6.41T_f - 1.94) * 10^{-3} \quad (2.12)$$

(Bouvet et al, 2010)

Σκοπός της παρούσας εργασίας, δε αποτελεί η διατύπωση ενός καινούριου ρεολογικού μοντέλου που περιγράφει το ΑΣΚ. Τα παραπάνω ρεολογικά μοντέλα, περιγράφηκαν για λόγους πληρότητας, ώστε να γίνει περισσότερο κατανοητή η μελέτη της ρεολογίας ενός ΑΣΚ.

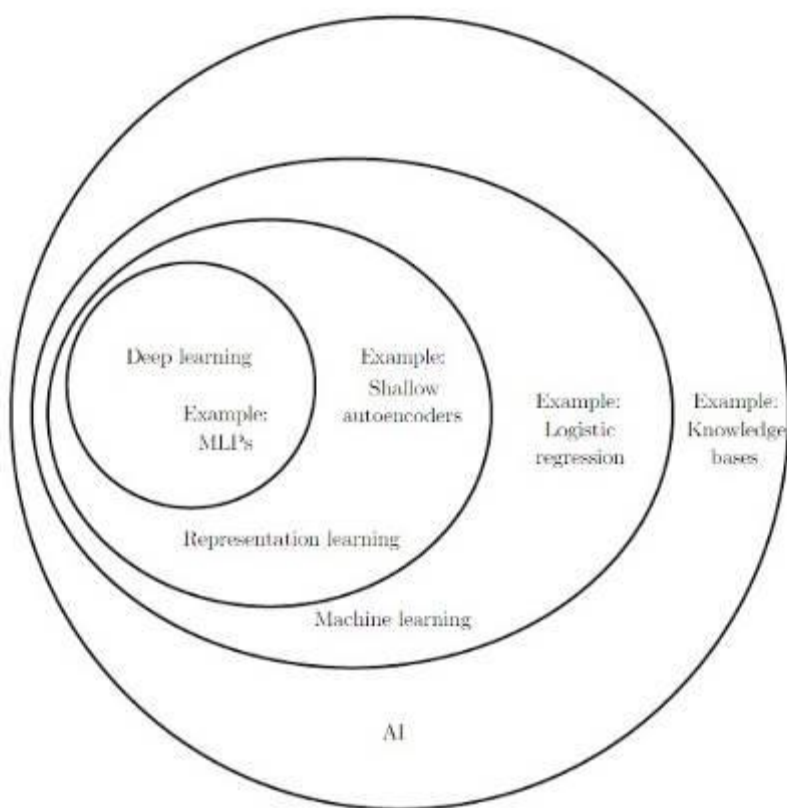
2.3 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

2.3.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και Βαθιά Μηχανική Μάθηση

Η μέθοδος των *Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων* που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, αποτελεί ένα είδος *Βαθιάς Μηχανικής Μάθησης υπό επίβλεψη* (Supervised Deep Learning). Συχνά, οι δύο όροι *Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα* και *Βαθιά Μηχανική Μάθηση* συγχέονται καθότι ορισμένοι από τους σύγχρονους αλγόριθμους εκμάθησης αποτελούν υπολογιστικά μοντέλα για το πως λειτουργούν ή θα μπορούσαν να λειτουργούν οι νευρώνες στον εγκέφαλο οποιουδήποτε έμβιου οργανισμού, προκειμένου να λάβει χώρα η διαδικασία της εκμάθησης. Η *Βαθιά Μηχανική Μάθηση* αποτελεί ένα σύνολο της *Μηχανικής Μάθησης* και επί της ουσίας, δίνει τη δυνατότητα στα υπολογιστικά συστήματα να δημιουργούν σύνθετες σχέσεις σύμφωνα με απλούστερες σχέσεις, προκειμένου να λύσουν ένα επιστημονικό πρόβλημα. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αποτελεί πρόβλημα ταξινόμησης (classification) ή παλινδρόμησης (regression) στην περίπτωση της *Μηχανικής Μάθησης υπό επίβλεψη*, ή ομαδοποίησης (clustering) στην περίπτωση της *Μηχανικής Μάθησης χωρίς επίβλεψη*. Ο όρος της *επίβλεψης* αφορά το είδος του περιεχομένου των εισερχομένων δεδομένων σε έναν αλγόριθμο Μηχανικής Μάθησης. Εάν στα δεδομένα περιλαμβάνονται

τα αποτελέσματα του εκάστοτε προβλήματος, τότε η εκμάθηση του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται προς επίλυσή του γίνεται υπό επίβλεψη, ενώ εάν το αποτέλεσμα απουσιάζει γίνεται χωρίς επίβλεψη.

Σύμφωνα με τον Arthur Samuel (1959) η *Μηχανική Μάθηση* αποτελεί «πεδίο μελέτης που δίνει στους υπολογιστές την ικανότητα να μαθαίνουν, χωρίς να έχουν ρητά προγραμματιστεί». Ένας πιο επιστημονικός ορισμός για τη συγκεκριμένη κατηγορία μάθησης δίδεται από τον Tom M. Mitchell, σύμφωνα με τον οποίο: «ένα πρόγραμμα υπολογιστή λέγεται ότι μαθαίνει από εμπειρία E ως προς μια κλάση εργασιών T και ένα μέτρο επίδοσης P , αν η επίδοσή του σε εργασίες της κλάσης T , όπως αποτιμάται από το μέτρο P , βελτιώνεται με την εμπειρία E ». Στην Εικόνα 13, φαίνονται οι υποκατηγορίες της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence), μέρος της οποίας αποτελεί η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) που περιλαμβάνει με τη σειρά της την Βαθιά Μάθηση και τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.



Εικόνα 13 Διάγραμμα κατά Venn, στο οποίο απεικονίζονται οι υποκατηγορίες της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI). Σε κάθε περίπτωση, αναγράφεται ένα παράδειγμα αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για το σκοπό της κάθε κατηγορίας. Στην περίπτωση της Βαθιάς Μηχανικής Μάθησης ως παράδειγμα αναφέρονται τα MLPs – Multilayer Perceptrons, μία κατηγορία Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. (Goodfellow et al 2016)

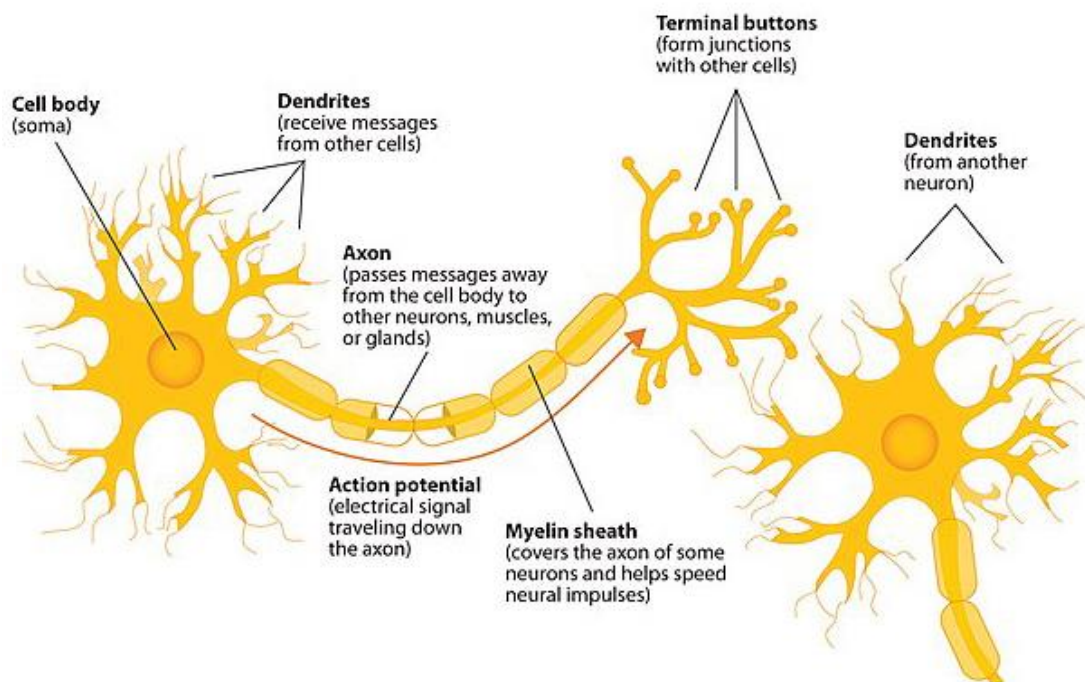
Παρά το γεγονός ότι η Βαθιά Μηχανική Μάθηση είναι μία μέθοδος η οποία ανθίζει με γοργούς ρυθμούς στη σημερινή εποχή, η ευρύτερη ιστορία της ξεκινάει από την αρχαία Ελλάδα και συγκεκριμένα από τη Μυθολογία, όπου διάφοροι εφευρέτες είχαν ως όνειρο να δημιουργήσουν «σκεπτόμενες μηχανές». Τέτοιοι εφευρέτες αποτέλεσαν οι Πυγμαλίων, Δαίδαλος και Ήφαιστος, ενώ ως «τεχνητές ζωές» χαρακτηρίστηκαν οι Γαλάτεια, Τάλως και Πανδώρα. Αρκετά χρόνια αργότερα, τη χρονική περίοδο 1940-1960, η Βαθιά Μάθηση

ονομαζόταν «cybernetics», ενώ περίπου είκοσι (20) χρόνια αργότερα, 1980-1990, ονομαζόταν «connectionism». Η σημερινή ονομασία του όρου δόθηκε το 2006, όπου και ξεκίνησε το τρίτο ιστορικό κύμα της Βαθιάς Μηχανικής Μάθησης, κι άρα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, με τις δημοσιεύσεις των Hinton et al (2006), Bengio et al (2007) και Ranzato et al (2007).

Η άνθιση που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μεθοδολογία τη σημερινή εποχή οφείλεται κατά κύριο λόγο σε τρεις (3) παράγοντες. Καταρχάς, η τεχνολογία των υπολογιστών χαρακτηρίζεται από αλματώδη εξέλιξη με αποτέλεσμα οι χρόνοι υπολογισμού των αλγορίθμων να μειώνονται κατακόρυφα. Έπειτα, υπάρχει πληθώρα πηγών, όσον αφορά τα εισερχόμενα δεδομένα στον εκάστοτε αλγόριθμο, που σημαίνει ότι η ακρίβεια του τελικού μοντέλου θα είναι εξαιρετικά ικανοποιητική, αφού τα προς εκμάθηση δεδομένα μπορούν να γίνουν πλούσια σε αριθμό. Τέλος, σημαντική βοήθεια στην άνθιση της Βαθιάς Μάθησης δίδει και το ποικίλο -όσον αφορά στους επιστημονικούς κλάδους- πεδίο εφαρμογών της, μιας και ολοένα και περισσότεροι επιστήμονες επιλέγουν να χρησιμοποιήσουν τη συγκεκριμένη μεθοδολογία προκειμένου να επιλύσουν τα προβλήματά τους, με αποτέλεσμα να γίνεται ολοένα και περισσότερο δημοφιλής.

2.3.2 Παράμετροι και Υπερπαράμετροι Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

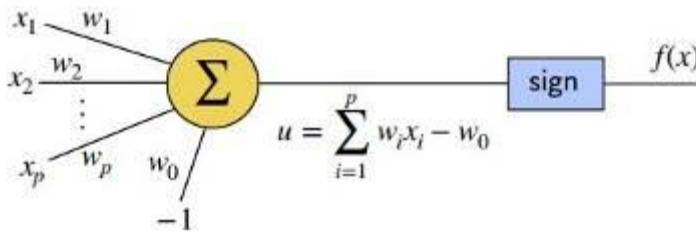
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μέθοδος των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) είναι εμπνευσμένη από τους βιολογικούς νευρώνες (Εικόνα 14). Κάθε βιολογικός νευρώνας αποτελείται από ένα κυτταρικό σώμα το οποίο περιλαμβάνει τον πυρήνα (cell body) και στο περίβλημά του φιλοξενεί έναν ή περισσότερους δενδρίτες (dendrites). Οι δενδρίτες συλλέγουν τα σήματα, τις νευρικές ώσεις, που στέλνονται στο κύτταρο και μέσω του άξονα (axon) τα μεταδίδουν από το κυτταρικό σώμα προς τους τερματισμούς (terminal buttons), με αποτέλεσμα να γίνεται αντιληπτό οποιοδήποτε ερέθισμα.



Εικόνα 14 Σχηματική απεικόνιση των βιολογικών νευρώνων.
(<https://plus.maths.org/content/maths-minute-artificial-neurons>)

Στην περίπτωση των τεχνητών νευρώνων (Εικόνα 15), η εξωτερική πληροφορία ακολουθεί αντίστοιχη διαδρομή. Κάθε παράμετρος, i , που χαρακτηρίζει μία πληροφορία, εισάγεται μία-προς-μία στον πυρήνα του τεχνητού νευρώνα, το γραμμικό τελεστή πρόσθεσης, Σ , πολλαπλασιαζόμενη από ένα βάρος, w_i (weight). Εκεί, με τη βοήθεια του δείκτη μεροληψίας, w_0 ή b (bias), η πληροφορία αλλάζει μορφή σύμφωνα με τη σχέση 2.13.

$$u = \sum_{i=0}^m x_i w_i - b, \quad V = f(u) \quad (2.13)$$



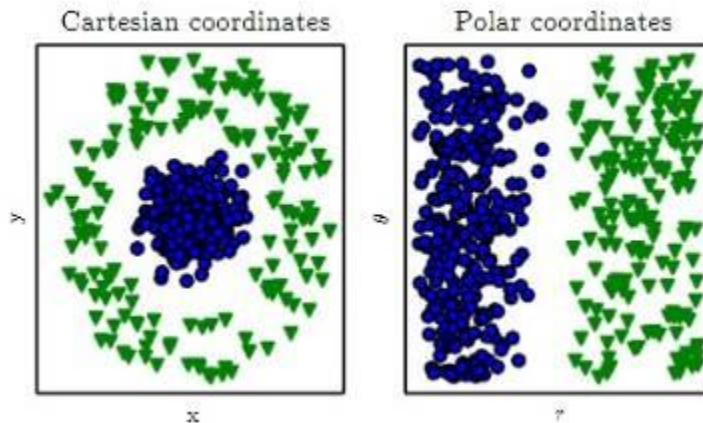
Εικόνα 15 Σχηματική απεικόνιση των τεχνητών νευρώνων.

Στη συνέχεια, μεταφέρεται σε μία μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης, $f(u)$, οπότε και προκύπτει το τελικό αποτέλεσμα, V . Η μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να είναι, μεταξύ άλλων:

- η σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoid function): $f(u) = \frac{1}{1+e^{-u}}$ (2.14)
- η συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης (tanh function): $f(u) = \tanh(u)$ (2.15)
- η συνάρτηση ReLu: $f(u) = \max(0, u)$ (2.16)

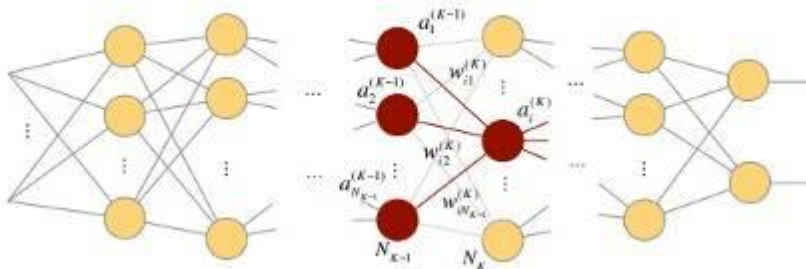
Τα ΤΝΔ δομούνται σε επίπεδα (layers), καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα πλήθος νευρώνων. Ο ελάχιστος αριθμός επιπέδων που μπορεί να έχει ένα ΤΝΔ είναι τρία: το επίπεδο εισερχομένων δεδομένων, ένα κρυφό επίπεδο και το επίπεδο εξερχομένων δεδομένων. Μέγιστος αριθμός επιπέδων δεν ορίζεται μιας και είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή να επιλέξει πόσα κρυφά επίπεδα θα χρησιμοποιήσει για το πρόβλημά του. Το πλήθος των νευρώνων ανά επίπεδο ονομάζεται πλάτος του δικτύου (width) ενώ ο αριθμός των κρυμμένων επιπέδων ονομάζεται βάθος του δικτύου (depth). Το βάθος σχετίζεται με το πόσο μη γραμμικό επιθυμεί να είναι το μοντέλο του ο σχεδιαστής, ενώ το πλάτος κάθε στρώσης αφορά την περιγραφική ικανότητά της.

Η μη γραμμικότητα των ΤΝΔ είναι ένα χαρακτηριστικό ζωτικής σημασίας για την επίλυση προβλημάτων. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα ταξινόμησης, συνήθως τα δεδομένα δεν είναι γραμμικά διαχωρίσιμα, δηλαδή δεν διαχωρίζονται με το τράβηγμα μίας ευθείας γραμμής, εάν πρόκειται για δεδομένα που ανήκουν στο διδιάστατο χώρο (Εικόνα 16). Τα όριά τους είναι μη γραμμικά κι επομένως ο αλγόριθμος θα πρέπει να εκπαιδευτεί με μη γραμμικά όρια απόφασης. Για το λόγο αυτόν, οι συναρτήσεις ενεργοποίησης που επιλέγονται είναι μη γραμμικές, όπως αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 16 Παράδειγμα μη γραμμικών διαχωρίσιμων δεδομένων. Αριστερά, παρουσιάζονται δεδομένα τα οποία απεικονίζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες και δεν είναι γραμμικά διαχωρίσιμα. Δεξιά, παρουσιάζονται τα ίδια δεδομένα αλλά μετασχηματισμένα σε πολικές συντεταγμένες. Πλέον, τα δεδομένα είναι γραμμικά διαχωρίσιμα. (Goodfellow, 2016)

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των νευρώνων αποτελεί η μεταξύ τους συνδεσμολογία (Εικόνα 17). Ένας νευρώνας που βρίσκεται στο K κρυφό επίπεδο, είναι πλήρως συνδεδεμένος με όλους τους νευρώνες του προηγούμενου, $K-1$ επιπέδου. Με άλλα λόγια, ως εισερχόμενα έχει τα εξερχόμενα από όλους τους νευρώνες της προηγούμενης στρώσης.



Εικόνα 17 Σχηματική απεικόνιση ενός ΤΝΔ με πλήρως συνδεδεμένους νευρώνες (multilayer feed-forward neural network structure) και αριθμό κρυμμένων στρώσεων μεγαλύτερο από K . Οι νευρώνες που είναι τονισμένοι με κόκκινο χρώμα σκιαγραφούν την διαδικασία ενεργοποίησης του νευρώνα i του στρώματος K , με $a_i^{(K)}$ να συμβολίζεται διαφορετικά το τελικό αποτέλεσμα V . (Goodfellow, 2016)

Συνοψίζοντας, έως το σημείο αυτό έχουν δοθεί οι ορισμοί των τεχνητών νευρώνων (βάρη, δείκτες μεροληψίας, συναρτήσεις ενεργοποίησης) καθώς και οι ορισμοί του πλάτους και του βάθους του δικτύου. Τα χαρακτηριστικά αυτά, πλην των βαρών και των δεικτών μεροληψίας, συνθέτουν την *Αρχιτεκτονική* ενός ΤΝΔ, η οποία όπως είναι φανερό δεν ακολουθεί μονοσήμαντους κανόνες. Η επιλογή των χαρακτηριστικών του δικτύου, προκειμένου να διαμορφωθεί η κατάλληλη Αρχιτεκτονική του, στηρίζεται στην εμπειρία του σχεδιαστή και στο ποσοστό κατανόησης του υπό μελέτη προβλήματος, γεγονός που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη διαδικασία περισσότερο ως «τέχνη» παρά ως «επιστήμη». Τα βάρη και οι δείκτες μεροληψίας αποτελούν τις *παραμέτρους* του ΤΝΔ, και είναι στην ουσία τα μεγέθη εκείνα που αναπροσαρμόζονται συνεχώς κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης του αλγορίθμου, δημιουργώντας τις κατάλληλες γραμμικές σχέσεις μεταξύ των νευρώνων. Όμως για να επιτευχθεί η σωστή προσαρμογή των παραμέτρων, κι άρα η

επιθυμητή τελική ακρίβεια του αλγορίθμου, είναι ανάγκη να οριστούν νέες παράμετροι του δικτύου, πέρα από την αρχιτεκτονική του, οι οποίες ονομάζονται υπερπαράμετροι.

Ως *υπερπαράμετροι* ονομάζονται οι παράμετροι εκείνες που επηρεάζουν τις επιδόσεις του μοντέλου στο σετ ελέγχου, αλλά δεν συμπεριλαμβάνονται στις προ-εκμάθησης παραμέτρους. Αυτές είναι ο ρυθμός εκμάθησης (learning rate, α), το μέγεθος της συστάδας δεδομένων (batch size), το σύνολο των εποχών εκπαίδευσης (epochs) και, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αρχιτεκτονική του αλγορίθμου. Ο *ρυθμός εκμάθησης*, α , είναι μία υπερπαράμετρος η οποία ορίζει το πόσο «γρήγορα» ή «αργά» γίνεται η ανανέωση των βαρών κατά τη διαδικασία της εκμάθησης. Το *batch size* (χρησιμοποιείται ο αγγλικός όρος γιατί έτσι είναι περισσότερο γνωστό το συγκεκριμένο μέγεθος) δηλώνει πόσα εκ του συνόλου των εισερχομένων δεδομένων εκπαίδευσης και επικύρωσης (training και validation) θα εισέρχονται στον αλγόριθμο εκμάθησης τη φορά (ο ορισμός των εισερχομένων δεδομένων λαμβάνει χώρα στην παράγραφο 2.3.3). Μόλις και η τελευταία ομάδα δεδομένων αυτών εισέλθει στο συγκεκριμένο αλγόριθμο, υλοποιείται μία *επανάληψη-εποχή εκπαίδευσης*. Ο αριθμός των εποχών είναι εκείνος που ορίζει πότε ολοκληρώνεται η διαδικασία της εκμάθησης κι άρα πότε ο αλγόριθμος είναι έτοιμος προς έλεγχο για χρήση.

2.3.3 Βελτιστοποίηση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων με εφαρμογή στο πρόβλημα της Ταξινόμησης

Η μεθοδολογία των ΤΝΔ χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία καθώς σκοπός της είναι η ανάπτυξη αλγορίθμου προκειμένου να χαρακτηρίζονται τυχαία μίγματα κονιαμάτων ως αυτοσυμπυκνούμενα ή όχι, σύμφωνα με τα ρεολογικά χαρακτηριστικά τους. Αυτό το είδος προβλήματος ανήκει στην κατηγορία της *ταξινόμησης*, αφού το αποτέλεσμα, της όλης διαδικασίας, δηλαδή το αν «είναι» ή «δεν είναι» αυτοσυμπυκνούμενο ένα κονίαμα, πρόκειται για διακριτή μεταβλητή (discrete variable). Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα διατυπώνεται ως ακολούθως:

Έστω: $z = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\} \subset \mathbb{R}^P \times \{1, \dots, c\}$, ένα σύνολο *δεδομένων* (ζευγών), με $x_i \in \mathbb{R}^P$, ένα *διάνυσμα χαρακτηριστικών* πραγματικών τιμών για κάποιο στοιχείο x , και: $c_i \in \{1, 2, \dots, c\}$, η *κλάση* (κατηγορία) στην οποία ανήκει το στοιχείο x . Στόχος του προβλήματος ταξινόμησης αποτελεί η σχεδίαση μίας απεικόνισης: $f: \mathbb{R}^P \rightarrow \{1, \dots, c\}$, που ταξινομεί σωστά το σύνολο των δεδομένων στις κλάσεις τους. Η απεικόνιση αυτή ονομάζεται *ταξινομητής* και δίνει στην έξοδό της την κλάση στην οποία ανήκει ένα στοιχείο x , όταν στην είσοδό της δέχεται το σύνολο τιμών των χαρακτηριστικών του x . Η διαδικασία ανάπτυξης της f από τα δεδομένα ονομάζεται *σχεδιασμός του ταξινομητή*, ενώ η διαδικασία της εκτέλεσης του f για κάποιο στοιχείο x ονομάζεται *ταξινόμηση του x στοιχείου*. Το στοιχείο αυτό, ορίζεται πως ταξινομείται σωστά αν και μόνο αν ισχύει ότι: $f(x) = y$, όπου y είναι η κλάση στην οποία ανήκει το στοιχείο x στην πραγματικότητα. (Στάμου)

Στην παρούσα εργασία, τα ΤΝΔ έχουν το ρόλο του *ταξινομητή*, ενώ η διαδικασία που απαιτείται προκειμένου να προσδιοριστούν οι σωστές παράμετροι και υπερπαράμετροι του αλγορίθμου, αποτελεί το *σχεδιασμό του ταξινομητή*. Τα διανύσματα x_i αποτελούνται από τα φυσικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων, ενώ το πλήθος των κλάσεων είναι 2, σύμφωνα με τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί. Για το λόγο αυτόν, το συγκεκριμένο πρόβλημα καλείται και ως *δυαδική ταξινόμηση*.

Πρώτο βήμα για τη διαμόρφωση του ταξινομητή ΤΝΔ αποτελεί ο ορισμός των εισερχομένων του, δηλαδή των *δεδομένων εκπαίδευσης* του αλγορίθμου (training data) και των *δεδομένων ελέγχου* του. Τα *δεδομένα εκπαίδευσης* του αλγορίθμου αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου των δεδομένων (συνήθως >70% του συνόλου των

δεδομένων) και σκοπό έχουν να εισάγουν στον αλγόριθμο την απαιτούμενη εμπειρία ώστε να διαμορφωθούν τα κατά το δυνατόν πιο σωστά βάρη, w , και οι κατά το δυνατόν πιο σωστοί δείκτες μεροληψίας, b . Τα δεδομένα ελέγχου του αλγορίθμου αποτελούν τα εναπομείναντα δεδομένα (συνήθως <30% του συνόλου των δεδομένων) και σκοπό έχουν να αξιολογήσουν αμερόληπτα την προσαρμογή του μοντέλου στη γεννήτρια κατανομή των δεδομένων εκπαίδευσης, ενώ αποτελούνται από δύο κατηγορίες, τα δεδομένα επικύρωσης (validation data) και τα δεδομένα δοκιμής (test data). Η πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης (συγκεκριμένα μόλις περάσουν από τον αλγόριθμο τα δεδομένα εκμάθησης) προκειμένου να γίνει σωστά η ρύθμιση των υπερπαραμέτρων του αλγορίθμου, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται με το πέρας της εκπαίδευσης, του αλγορίθμου, ώστε να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση των πραγματικών επιδόσεων πρόβλεψής του.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων, δηλαδή τα στοιχεία του διανύσματος x_i του προβλήματος της ταξινόμησης ή αλλιώς τα εισερχόμενα δεδομένα του αλγορίθμου, περιλαμβάνουν μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν διαφορετικές ιδιότητες των συστατικών τους. Ορισμένα από αυτά είναι η ποσότητα κάποιου κοκκώδους υλικού, το μέτρο λεπτότητάς του ή ακόμα και η σφαιρικότητά του. Εξ ορισμού, οι τιμές τέτοιων μεγεθών ανήκουν σε διαφορετική αριθμητική κλίμακα (π.χ. η ποσότητα του τσιμέντου σε ένα μίγμα, για παράδειγμα, είναι της τάξεως του 10^2 kg/m^3 ενώ η σφαιρικότητα ενός πληρωτικού υλικού είναι της τάξεως του 10^{-1}), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει τον αλγόριθμο σε αργή σύγκλιση κατά την εκμάθησή του. Συνεπώς, προκειμένου τα εισερχόμενα δεδομένα να «κινούνται» με την ίδια ταχύτητα προς τη σύγκλιση, λαμβάνει χώρα η διαδικασία της κανονικοποίησης. Δύο μεθοδολογίες που μπορούν να ακολουθηθούν είναι οι εξής:

$$x_{scaled} = \frac{x_i - mean_value}{std} \quad (2.17)$$

$$x_{scaled} = \frac{x_i - min_value}{max_value - min_value} \quad (2.18)$$

όπου:

x_{scaled} : είναι η κανονικοποιημένη τιμή της παραμέτρου i των εισερχομένων δεδομένων

x_i : η αρχική τιμή της παραμέτρου i

$mean_value$: η μέση τιμή της παραμέτρου i

std : η τυπική απόκλιση της παραμέτρου i

min_value : η ελάχιστη τιμή της παραμέτρου i

max_value : η μέγιστη τιμή της παραμέτρου i

Έπειτα από την κατάλληλη επεξεργασία των εισερχομένων δεδομένων, ορίζεται αυθαίρετα μία πρώτη αρχιτεκτονική του μοντέλου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Onyari & Ikotun, 2018), η επιλογή αυτή μπορεί να ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

$$N_{hidden} = \sqrt{N_{inp} * N_{out}} \quad (2.19)$$

όπου:

N_{hidden} : ο αριθμός των νευρώνων εντός ενός κρυμμένου επιπέδου του αλγορίθμου

N_{inp} : ο αριθμός των εισερχομένων παραμέτρων στο πρώτο επίπεδο του αλγορίθμου

N_{out} : ο αριθμός των εξερχομένων παραμέτρων στο πρώτο επίπεδο του αλγορίθμου

Από τον ορισμό της ταξινόμησης, για να χαρακτηριστεί ένας αλγόριθμος ΤΝΔ αξιόπιστος, θα πρέπει τα προβλεπόμενα εξερχόμενα δεδομένα να ταυτίζονται σε ένα μεγάλο ποσοστό (δηλαδή με μικρό σφάλμα) με τα πραγματικά εξερχόμενα δεδομένα, πρώτα σε επίπεδο εκμάθησης κι έπειτα σε επίπεδο ελέγχου. Αναφορικά με το επίπεδο εκμάθησης, η μετρική που χρησιμοποιείται για χαρακτηρισμό του σφάλματος είναι η *Συνάρτηση Εμπειρικού Κόστους* (empirical Loss), L , εκφρασμένη με τη βοήθεια της συνάρτησης κόστους *Binary Cross Entropy*:

$$L(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathcal{L}(f(x_i, w_i), y_i), \quad f(x_i, w_i) = y_{predicted} \quad (2.20)$$

όπου:

n : το μέγεθος του δείγματος

\mathcal{L} : η συνάρτηση κόστους Binary Cross Entropy

w_i : το βάρος της παραμέτρου x_i των εισερχόμενων δεδομένων

$\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$: το ζεύγος της παραμέτρου των εισερχόμενων δεδομένων και του αποτελέσματος στο οποίο αντιστοιχεί

$y_{predicted}$: τα εξερχόμενα δεδομένα κατόπιν πρόβλεψης

f : ο ταξινομητής ΤΝΔ

Η συγκεκριμένη συνάρτηση επί της ουσίας, αποτελεί το μέσο όρο των επιμέρους συναρτήσεων κόστους για κάθε σημείο.

Η *εκπαίδευση* του αλγορίθμου ΤΝΔ ονομάζεται διαφορετικά και *βελτιστοποίησή* του καθώς αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία προκύπτουν, σύμφωνα με την εισερχόμενη εμπειρία, εκείνα τα βάρη και οι δείκτες μεροληψίας, οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα την *ελάχιστη τιμή του εμπειρικού σφάλματος* (τοπικό ελάχιστο). Η μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι η *Στοχαστική Μέθοδος Καταβιβασμού Κλίσης* (Stochastic Gradient Descent). Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο, γίνεται τυχαία αρχικοποίηση των βαρών και των δεικτών μεροληψίας, και υπολογίζεται η προβλεπόμενη τιμή των εξερχόμενων δεδομένων. Στη συνέχεια, ορίζεται ο ρυθμός εκμάθησης, α , και υπολογίζονται οι μερικές παράγωγοι της συνάρτησης κόστους ως προς τα βάρη και το δείκτη μεροληψίας, όπως φαίνεται στις σχέσεις που ακολουθούν. Έτσι, γίνεται ανανέωση των παραμέτρων και ουσιαστικά ολοκληρώνεται μία επανάληψη της μεθόδου.

$$w = w - \alpha \nabla_w L, \quad \frac{\partial}{\partial w} L(w) = \nabla_w L \quad (2.21)$$

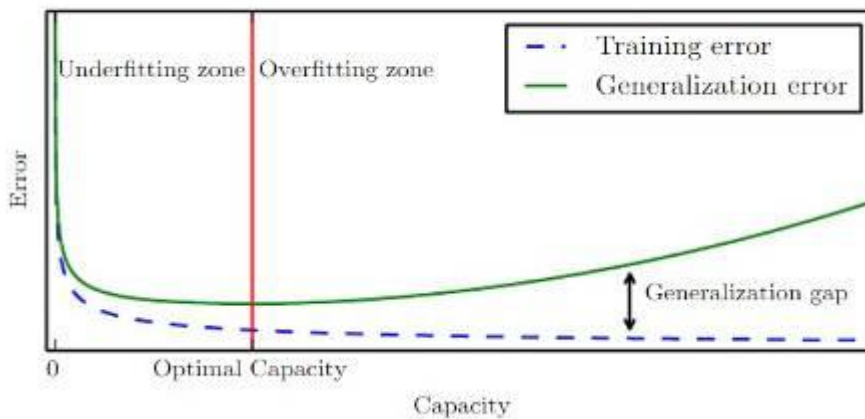
$$b = b - \alpha \nabla_b L, \quad \frac{\partial}{\partial b} L(w) = \nabla_b L \quad (2.22)$$

Ο αλγόριθμος που υλοποιεί τη διαδικασία αυτή, στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας, είναι ο *Adam Optimizer*. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ανήκει στην κατηγορία των *back-propagation training algorithms*, των αλγορίθμων εκμάθησης δηλαδή που περιλαμβάνουν τον κανόνα της αλυσίδας ως τρόπο υπολογισμού της πρώτης παραγώγου της κάθε παραμέτρου.

Η υπερπαραμέτρος *ρυθμός εκμάθησης*, α , είναι μία από τις σημαντικότερες υπερπαραμέτρους. Στις περιπτώσεις περίπλοκων ΤΝΔ, το τοπικό ελάχιστο, μεταξύ των

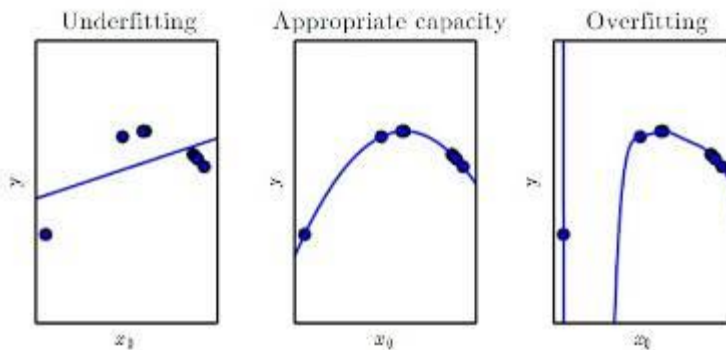
πολλών, που χαρακτηρίζεται ως «καλό», είναι εκείνο του οποίου η τιμή της συνάρτησης κόστους είναι σχετικά κοντά με αυτή του πραγματικού ολικού ελαχίστου της συνάρτησης, άρα και της βέλτιστης προσαρμογής του μοντέλου. Επειδή η Μέθοδος Καταβίβασμού Κλίσης συγκλίνει στο κοντινότερο τοπικό ελάχιστο από το σημείο αρχικοποίησης των βαρών, το τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στην αρχικοποίηση των παραμέτρων του. Η κατάλληλη επιλογή ρυθμού εκμάθησης, επιτρέπει στη μεθοδολογία αυτή να υπερπηδήσει ορισμένα τοπικά ελάχιστα, αφού η συγκεκριμένη υπερπαραμέτρος καθορίζει το μέγεθος του βήματος σε κάθε επανάληψη. Αυτό σημαίνει ότι εάν είναι μεγάλη, ελλοχεύει κίνδυνος για παράλειψη κάποιου σημαντικού τοπικού ελαχίστου ή για αδυναμία σύγκλισης, ενώ εάν είναι μικρή, μπορεί να γίνει η σύγκλιση σε «κακό» τοπικό ελάχιστο ή με πολύ αργό ρυθμό.

Οι υπερπαραμέτροι batch size και το πλήθος των εποχών-επαναλήψεων, παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο στην εκπαίδευση του αλγορίθμου. Η ομαδοποίηση των δεδομένων σε *batches* (ισομερή υποσύνολα δεδομένων) λαμβάνει χώρα λόγω του ότι η Μέθοδος Καταβίβασμού Κλίσης, τις περισσότερες φορές, είναι τεχνικά αδύνατο να εφαρμοστεί απευθείας στα δεδομένα, λόγω της περιορισμένης διαθέσιμης μνήμης RAM στα υπολογιστικά συστήματα. Συνεπώς, επιλέγεται η συνάρτηση εμπειρικού κόστους να ελαχιστοποιείται σταδιακά, σε μία ομάδα δεδομένων τη φορά, αντί να ελαχιστοποιείται ως προς ένα δεδομένο τη φορά ή ως προς όλα τα δεδομένα μαζί. Το πλήθος των εποχών-επαναλήψεων της Μεθόδου Καταβίβασμού Κλίσεων σε συνδυασμό με το εμπειρικό κόστος, φανερώσει πότε διαμορφώνεται το βέλτιστο μοντέλο ΤΝΔ, μέσω του διαγράμματος Loss (training - iterations). Στο διάγραμμα της Εικόνα 18, απεικονίζονται δύο καμπύλες σφάλματος, μία για τα δεδομένα εκπαίδευσης και μία για τα δεδομένα επικύρωσης, τα οποία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, περνάνε από τον αλγόριθμο μόλις εκπαιδευτεί, σύμφωνα με τα δεδομένα εκπαίδευσης. Από τις δύο καμπύλες εκπαίδευσης (μπλε διακεκομμένη γραμμή) και επικύρωσης (πράσινη συνεχής γραμμή) είναι φανερό ότι τα δύο αυτά σετ δεδομένων συμπεριφέρονται διαφορετικά κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Με την αύξηση των εποχών, το σφάλμα των δεδομένων εκπαίδευσης ελαττώνεται, ενώ το σφάλμα των δεδομένων επικύρωσης έχει αρχικά πτωτική τάση και στη συνέχεια, από τη βέλτιστη περιοχή και μετά, αυξάνεται. Η κόκκινη γραμμή δηλώνει τη περιοχή εποχών όπου ο αλγόριθμος βελτιστοποιείται. Κάτω από την βέλτιστη περιοχή αυτή, το μοντέλο δεν έχει προλάβει να προσαρμοστεί στη γεννήτρια κατανομή των εισερχομένων δεδομένων, *underfitted*, ενώ πάνω από την ίδια περιοχή, το μοντέλο έχει υπερπροσαρμοστεί στη γεννήτρια κατανομή των εισερχομένων δεδομένων, *overfitted*.



Εικόνα 18 Τυπική σύνθετη καμπύλη μεταξύ εμπειρικού σφάλματος και πλήθους εποχών-επαναλήψεων ενός αλγορίθμου ΤΝΔ. (Goodfellow, 2016)

Η υπερπροσαρμογή αυτή φαίνεται από το γεγονός ότι τα δεδομένα επικύρωσης αρχίζουν να δίνουν μεγάλο εμπειρικό λάθος σε αντίθεση με τα δεδομένα εκπαίδευσης, τα οποία δίνουν εμπειρικό λάθος που τείνει στο μηδέν. Η πορεία που ακολουθούν οι συσχετίσεις του αλγορίθμου μεταξύ των παραμέτρων του προβλήματος στις περιπτώσεις της υποπροσαρμογής και της υπερπροσαρμογής, δηλαδή οι μαθηματικές σχέσεις μεταξύ εισερχομένων και προβλεπόμενων και πραγματικών εξερχομένων, απεικονίζονται στην Εικόνα 19



Εικόνα 19 Γραφική απεικόνιση των εννοιών της υπερπροσαρμογής και της υποπροσαρμογής του αλγορίθμου στη γεννήτρια κατανομή εισερχομένων δεδομένων. Στην πρώτη περίπτωση ο αλγόριθμος δεν έχει εκπαιδευτεί πλήρως και στην τελευταία, ο αλγόριθμος μπορεί να αναγνωρίσει μόνο τα δεδομένα εκπαίδευσης. (Goodfellow, 2016)

Μία ακόμα μετρική που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της εκπαίδευσης ενός αλγορίθμου πηγάζει από τον πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) του δυαδικού λογικού προβλήματος της ταξινόμησης. Σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4), η μία κατηγορία του προβλήματος αυτού θεωρείται ως «θετική» και η άλλη ως «αρνητική», ή διαφορετικά ως «αληθής» και ως «ψευδής». Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται η κατηγοριοποίηση του αποτελέσματος της κάθε πρόβλεψης που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος, ορίζοντας έτσι μία σειρά από θεμελιώδεις μετρικές. Μία εξ αυτών, αποτελεί η ακρίβεια (accuracy) της ταξινόμησης, η οποία ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (2.23)$$

Πίνακας 4 Τυπική μορφή του Πίνακα Σύγκρισης ενός δυαδικού λογικού προβλήματος Ταξινόμησης.

	θετικό δείγμα	αρνητικό δείγμα
θετική πρόβλεψη	<i>True Positive</i> (<i>TP</i>)	<i>False Positive</i> (<i>FP</i>)
αρνητική πρόβλεψη	<i>False Negative</i> (<i>FN</i>)	<i>True Negative</i> (<i>TN</i>)

Πέρα από το επίπεδο εκμάθησης, μετρικές χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση του επιπέδου ελέγχου. Αφού ο αλγόριθμος έχει βελτιστοποιηθεί, χρησιμοποιείται προκειμένου να προβλέψει μία νέα σειρά δεδομένων, τα δεδομένα δοκιμής (test data). Η πρόβλεψή τους ελέγχεται υπολογίζοντας την ακρίβεια των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πραγματικά, ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία με την περίπτωση της ακρίβειας κατά την φάση εκπαίδευσης. Εάν η τιμή της δεν είναι αποδεκτή, ο σχεδιαστής οφείλει να αλλάξει τις υπερπαραμέτρους και παραμέτρους που όρισε αρχικά και να ξανατρέξει τη διαδικασία της εκπαίδευσης έως τελικά να επιτευχθεί η αποδεκτή ακρίβεια στα δεδομένα δοκιμής. Η τελευταία αυτή μετρική, είναι εκείνη η οποία στην ουσία αναγνωρίζει εάν ο αλγόριθμος ΤΝΔ που δημιουργήθηκε μπορεί να χαρακτηριστεί ως αμερόληπτος.

3 Πειραματικό μέρος

Πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας αποτελεί η καταγραφή όσο το δυνατόν περισσότερων συνθέσεων ΑΣΚ, διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα σε δύο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση συλλογής δεδομένων, διεξάγονται πειραματικές δοκιμές που σκοπό έχουν την παρασκευή κονιαμάτων, είτε αυτά επιτυγχάνουν τα κριτήρια της αυτοσυμπύκνωσης είτε όχι. Το γεγονός ότι συμπεριλαμβάνονται οι αποτυχημένες συνθέσεις ΑΣΚ στα δεδομένα, αποτελεί το πλεονέκτημα της πρώτης φάσης καθώς ο αλγόριθμος ΤΝΔ θα πρέπει να έχει εμπειρία όσον αφορά στην αποτυχία σύνθεσης ΑΣΚ, γεγονός σπάνιο να λάβει χώρα όσον αφορά τη δεύτερη φάση συλλογής δεδομένων, όπου οι περισσότερες συνθέσεις αντιστοιχούν σε επιτυχημένες συνθέσεις ΑΣΚ. Το μειονέκτημα της φάσης αυτής είναι ότι τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα σε αριθμό αφού το κόστος και ο χρόνος που απαιτεί κάθε είδος πειραματικής δοκιμής είναι σημαντικοί παράγοντες, ενώ υπάρχει κίνδυνος όλες οι συνθέσεις να ακολουθούνται από το ίδιο συστηματικό σφάλμα με αποτέλεσμα να προκύψει εσφαλμένο μοντέλο πρόβλεψης αυτοσυμπυκνωσιμότητας. Η δεύτερη φάση συλλογής δεδομένων, αφορά τη βιβλιογραφική έρευνα. Η φάση αυτή είναι εξίσου σημαντική με την πρώτη καθώς προσθέτει στη βάση δεδομένων πληθώρα συνθέσεων ΑΣΚ, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τη μεταξύ τους ανεξαρτησία και από ποικιλομορφία συστατικών υλικών, εφόσον προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Συνεπώς, η έννοια του συστηματικού λάθους δεν είναι έντονη στην παρούσα φάση, σε αντίθεση με την έννοια των σφαλμάτων ανάγνωσης και μετατροπής μονάδων ή υπολογισμού μεγεθών, μιας και απαιτείται προσαρμογή και μεταφορά δεδομένων από τις δημοσιεύσεις στη βάση δεδομένων της παρούσας εργασίας. Τέλος, ένα δεύτερο μειονέκτημα της δεύτερης φάσης είναι ότι δεν περιέχονται σε κάθε δημοσίευση όλες οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν μία σύνθεση ΑΣΚ με αποτέλεσμα να απαιτείται επιπλέον παρέμβαση στα αρχικά δεδομένα.

Τα συστατικά υλικά ενός ΑΣΚ είναι το νερό, το τσιμέντο, τα πρόσθετα υλικά, τα λεπτόκοκκα αδρανή καθώς και ο υπερρευστοποιητής και ο παράγοντας τροποποίησης ιξώδους, για τις περιπτώσεις που είναι αναγκαία η προσθήκη του στο μίγμα. Μία πλήρης και ακριβής περιγραφή του μίγματος του ΑΣΚ περιλαμβάνει την κατά το δυνατόν πιο λεπτομερή επιλογή των ιδιοτήτων των συστατικών υλικών, αναφορικά με τα φυσικά τους χαρακτηριστικά και τις ποσότητές τους στο μίγμα, οι οποίες αποτελούν πλήρως ανεξάρτητες, μεταξύ τους, μεταβλητές, ώστε να προκύψει τελικά η βέλτιστη ακρίβεια του αλγορίθμου ΤΝΔ. Στην παρούσα εργασία για τον σκοπό αυτόν, επιλέχθηκαν οι 21 παράμετροι που ακολουθούν, ανά κατηγορία συστατικού υλικού:

1. Νερό: η ποσότητά του (kg/m^3)
2. Τσιμέντο: η ποσότητά του (kg/m^3) και η ειδική του επιφάνεια (cm^2/g)
3. Πρόσθετο υλικό: η ποσότητά του (kg/m^3), η κοκκομετρική του διαβάθμιση εκφρασμένη στη διάμετρο του κόσκινου (μm) που απαιτείται ώστε να το διαπερνά συγκεκριμένο ποσοστό υλικού ($D90$, $D70$, $D50$, $D30$, $D10$), η ειδική του επιφάνεια (cm^2/g), το ειδικό του βάρος (g/cm^3), η σφαιρικότητά του (αποτελεί συντελεστή που δεν έχει μονάδες μέτρησης)
4. Λεπτόκοκκα αδρανή: η ποσότητά τους (kg/m^3), η κοκκομετρική τους διαβάθμιση εκφρασμένη στη διάμετρο του κόσκινου (μm) που απαιτείται ώστε να το διαπερνά συγκεκριμένο ποσοστό, τη φορά, αδρανούς ($D90$, $D70$, $D50$, $D30$, $D10$), ο μέγιστος κόκκος αδρανών (μm), το μέτρο λεπτότητάς τους, το ειδικό τους βάρος (g/cm^3)

Αναφορικά με τη *σφαιρικότητα* των πληρωτικών υλικών, εάν υπήρχαν οι κατάλληλες συνθήκες για την τριδιάστατη ανάλυση των κόκκων ενός ορυκτολογικού υλικού, θα ισούταν, σύμφωνα με τον Wadell (1933), με την αναλογία της επιφάνειας μιας σφαίρας του ίδιου όγκου με το σωματίδιο, προς την πραγματική επιφάνεια του σωματιδίου. Όμως, λόγω της δυσκολίας του υπολογισμού αυτής της τριδιάστατης επιφάνειας των κόκκων, ακολουθείται ένας πιο πρακτικός «διδιάστατος» ορισμός σύμφωνα με τον οποίο η σφαιρικότητα των κόκκων ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_A = \frac{A_S}{A_{CIR}} \quad (2.24)$$

όπου:

A_S : είναι η επιφάνεια της προβολής ενός κόκκου του υλικού σε ένα επίπεδο, και

A_{CIR} : είναι η επιφάνεια του μικρότερου περιγεγραμμένου κύκλου στην προβολή αυτή. (Zheng & Hryciw, 2015)

Τέλος, άξιο παρατήρησης είναι και το γεγονός πως από τη λίστα με τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν ένα μίγμα ΑΣΚ, απουσιάζουν τα χαρακτηριστικά του υπερρευστοποιητή και του παράγοντα τροποποίησης ιξώδους. Όπως έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η προσθήκη των συγκεκριμένων προσμίκτων αποτελεί αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη ώστε να χαρακτηριστεί ένα μίγμα ως μίγμα ΑΣΚ. Επομένως επιλέγεται στην παρούσα εργασία να μην συμπεριληφθούν τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων συστατικών, ώστε να αξιολογηθούν οι συνθέσεις εκείνες που αποτελούν ούτως ή άλλως ΑΣΚ, ή που αποτελούν τη σωστή βάση προκειμένου να χαρακτηριστούν ως συνθέσεις ΑΣΚ που χαρακτηρίζονται από *ευρωστία* (robustness).

3.1 Πειραματικά Δεδομένα

Η πρώτη φάση συλλογής δεδομένων λαμβάνει χώρα, όπως αναφέρεται και στην προηγούμενη Ενότητα, με τη διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών που σκοπό έχουν την παρασκευή επιτυχημένων και αποτυχημένων συνθέσεων ΑΣΚ. Οι πειραματικές δοκιμές είναι τρεις σε αριθμό, και περιλαμβάνουν τη *δημιουργία* ενός *νωπού κονιάματος* και τον έλεγχο των ρεολογικών του ιδιοτήτων με τη βοήθεια της *μικρής δοκιμής εξάπλωσης* και της *μικρής δοκιμής χοάνης V*, σύμφωνα με τον κανονισμό EFNARC 2005. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την πραγματοποίηση των συγκεκριμένων δοκιμών έχει ως εξής:

1. Σύνθεση νωπού κονιάματος
 - a. αναμεικτήρας νωπού κονιάματος, TONIDUSTRIE
 - b. αναλυτικός ζυγός
 - c. 1 ποτήρι ζέσεως των 1000 mL
 - d. 6 ακρυλικά δοχεία μικρού μεγέθους για μέτρηση της μάζας μικροποσοτήτων προσμίκτων
2. Μικρή διάταξη δοκιμής εξάπλωσης (mini Slump-Flow test)
 - a. μεταλλικός κώνος (cone) με διαστάσεις όπως αυτές αναφέρονται στην Ενότητα 2.1.3
 - b. επίπεδη τετραγωνική μεταλλική βάση (baseplate) διαστάσεων τουλάχιστον 900x900 mm και πάχος το λιγότερο 2 mm
 - c. χάρακας (rule) βαθμονομημένος από 0 mm έως 500 mm, με ακρίβεια 1 mm
3. Μικρή διάταξη δοκιμής χοάνης V (mini V-Funnel test)

- a. μεταλλική χοάνη σχήματος V (V-funnel) με διαστάσεις όπως αυτές αναφέρονται στην Ενότητα 2.1.3
- b. δοχείο (container) χωρητικότητας τουλάχιστον 3 L
- c. χρονόμετρο (stop watch) με ακρίβεια 0.1 s
- d. μεταλλική σπάτουλα (straight edge) για την απομάκρυνση περιττής ποσότητας σκυροδέματος από τη στέψη της χοάνης

Στις εικόνες 20 και 21 που ακολουθούν, φαίνονται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 20 Πειραματικός εξοπλισμός για τη σύνθεση νοπού κονιάματος.



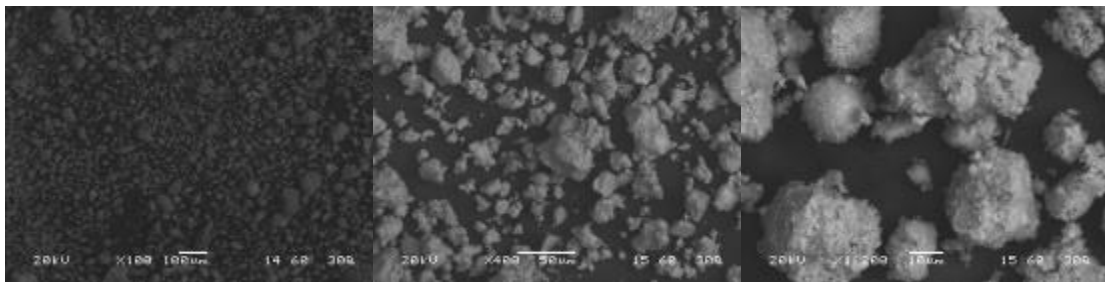
Εικόνα 21 Πειραματικός εξοπλισμός για τις δοκιμές Μικρή δοκιμή εξάπλωσης και Μικρή δοκιμή χοάνης V.

Για τη σύνθεση νοπού κονιάματος, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται αναλυτικά στην επόμενη λίστα.

1. νερό (water) από τη βρύση του εργαστηρίου
2. τσιμέντο Portland (Portland cement), κατηγορίας CEM I 42.5R, σύμφωνα με το EN 197-1:2011

3. ασβεστολιθική άμμος (calcareous limestone sand) 0/4 mm με ειδικό βάρος 2.67 g/cm^3 και μέτρο λεπτότητας 2.73, σύμφωνα με το EN 1260:2013
4. οκτώ διαφορετικά πληρωτικά υλικά (filler materials):
 - a. δύο διαφορετικής κοκκομετρίας μαρμαρόσκονες (marble powder)
 - b. κοσκινισμένο κλάσμα ($<125 \mu\text{m}$) ελαφρόπετρας (pumice powder)
 - c. κοσκινισμένο κλάσμα ($<125 \mu\text{m}$) περλίτη (perlite powder)
 - d. μικροπυριτία (micro silica)
 - e. διογκωμένα σφαιρίδια περλίτη (expanded perlite pellets)
 - f. σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων (cement kiln dust, CKD)
 - g. σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκαμψης της περιστροφικής καμίνου (by pass dust, BPD)
5. χημικά πρόσμικτα (chemical admixtures), υπερρευστοποιητής (SP) και παράγοντας τροποποίησης ιξώδους (VMA), που χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή ΑΣΚ και ΑΣΣ (σύμφωνα με το τέλος της Ενότητας 3, τα χαρακτηριστικά τους δεν συμπεριλαμβάνονται).

Προκειμένου να υπολογιστεί η σφαιρικότητα των άνωθι οκτώ πληρωτικών υλικών, έλαβε χώρα η πειραματική διαδικασία της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM). Δείγματα του κάθε πληρωτικού υλικού, εισήχθησαν στο μικροσκόπιο και προέκυψαν οι εικόνες των μικροκόκκων τους (μιας και το μέγεθός τους ανήκει στην κλίμακα των μm) με μεγέθυνση από $\times 100$ έως $\times 2200$ (Εικόνα 22). Στη συνέχεια, στις εικόνες αυτές εντοπίστηκαν οι 50 πιο αντιπροσωπευτικοί κόκκοι σε κάθε περίπτωση, και με τη βοήθεια του λογισμικού ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας, *Image J*, υπολογίστηκαν 2 γεωμετρικά χαρακτηριστικά: η επιφάνειά τους και η μέγιστη διάμετρος τους, ώστε να προκύψουν τα μεγέθη A_s και A_{cir} αντίστοιχα κι έτσι να υπολογιστεί η σφαιρικότητά τους (βλ. τρόπο υπολογισμού σφαιρικότητας στην Ενότητα 3).



Εικόνα 22 Εικόνες SEM για το πληρωτικό υλικό BPD, με μεγέθυνση από αριστερά προς τα δεξιά $\times 100$, $\times 400$ και $\times 1200$ αντίστοιχα.

Η πειραματική διαδικασία δημιουργίας ενός νωπού κονιάματος ξεκινάει με την ανάμιξη των ξηρών υλικών (τσιμέντο, λεπτόκοκκα αδρανή και πρόσθετα) στον αναδευτήρα για 60 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, προστίθεται το νερό και η ανάμιξη συνεχίζεται για τα επόμενα 120 δευτερόλεπτα. Για τα μίγματα που σχεδιάζονται να αποτελούν πετυχημένη σύνθεση ΑΣΚ, η δόση των χημικών πρόσμικτων προστίθεται στο μίγμα σταδιακά, και ακολουθεί, μετά από κάθε ξεχωριστή προσθήκη, ανάμιξη στον αναδευτήρα για ακόμα 60 δευτερόλεπτα. Με το πέρας της επιτυχούς ανάμιξης όλων των συστατικών υλικών, το νωπό κονίαμα που δημιουργείται υποβάλλεται στις δοκιμές για τον έλεγχο αυτοσυμπυκνωσιμότητάς του κατά την EFNARC.



Εικόνα 23 Πειραματική διαδικασία παρασκευής νωπού κονιάματος.

Με μία πιο σύντομη περιγραφή από αυτήν της Ενότητας 2.1.3 όσον αφορά στις δοκιμές ελέγχου αυτοσυμπυκνωσιμότητας των κονιαμάτων κατά την EFNARC, 2005, αναφέρεται στη συνέχεια. Το νωπό κονίαμα που παρασκευάστηκε κατά την προηγούμενη πειραματική διαδικασία, χύνεται στον μεταλλικό κώνο της μικρής διάταξης δοκιμής εξάπλωσης, και απομακρύνεται το υλικό που ξεχειλίζει από την κορυφή του. Ο κώνος αποσύρεται προς τα πάνω και το κονίαμα εξαπλώνεται στην επίπεδη τετραγωνική μεταλλική βάση, οπότε και μετράται η μέση διάμετρος της εξάπλωσης με το χάρακα. Στη συνέχεια, το νωπό κονίαμα συλλέγεται σε ένα δοχείο και υποβάλλεται στη μικρή διάταξη δοκιμής χοάνης V. Το φρέσκο κονίαμα λοιπόν, εισάγεται στη μεταλλική χοάνη σχήματος V, απομακρύνεται το υλικό που ξεχειλίζει από την κορυφή της με τη μεταλλική σπάτουλα, και με το άνοιγμα της θύρας που βρίσκεται στην κάτω άκρη της ξεκινάει η χρονομέτρηση. Μόλις το κονίαμα, που πέφτει στο δοχείο, σταματήσει να ρέει, σταματάει και η χρονομέτρηση. (Guidelines & Concrete, 2005)



Εικόνα 24 Εικόνες από την πειραματική διαδικασία της μικρής διάταξης δοκιμής εξάπλωσης.

Εάν ικανοποιηθούν και τα δύο κριτήρια των συγκεκριμένων δοκιμών, το κονίαμα χαρακτηρίζεται ως ΑΣΚ και σημειώνεται ως «1» στη λίστα των συνθέσεων κονιαμάτων, ενώ σε αντίθετη περίπτωση σημειώνεται ως «0». Βέβαια, όπως αναφέρεται στην Ενότητα 3, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αξιολογήσει μίγματα που αποτελούν τη σωστή βάση προκειμένου να χαρακτηριστούν ως συνθέσεις ΑΣΚ. Για μία πιο ακριβή εκτίμηση λοιπόν, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν όχι μόνο τα όρια που ορίζουν οι κανονισμοί, αλλά και η επίδραση που έχουν τα χημικά πρόσμικτα στη ρεολογική συμπεριφορά των μιγμάτων νωπού κονιάματος. Η προσθήκη υπερρευστοποιητή σε ένα μίγμα αυξάνει τη διάμετρο εξάπλωσής του και μειώνει τον χρόνο εκκένωσής του από τη χοάνη V, ενώ η προσθήκη παράγοντα τροποποίησης ιζώδους ελαττώνει τη διάμετρο εξάπλωσής του και αυξάνει τον χρόνο εκκένωσης από τη χοάνη V. Αυτές οι ιδιότητες δηλώνουν ότι με κατάλληλες ρυθμίσεις των ποσοτήτων των χημικών προσμίκτων, ένα μίγμα που έχει τη σωστή βάση ώστε να χαρακτηριστεί ως ΑΣΚ μπορεί να αποτελέσει ΑΣΚ, στην περίπτωση που δεν

πληροί τα κριτήρια των κανονισμών, απλά αλλάζοντας τις ποσότητες των προσμίκτων. Επομένως, τέτοιες περιπτώσεις συνθέσεων σημειώνονται ως «1» στη λίστα των συνθέσεων κονιαμάτων. Η μεθοδολογία αυτή, ακολουθείται και κατά την συλλογή συνθέσεων κονιαμάτων από τη βιβλιογραφική έρευνα, η οποία και ακολουθεί.

3.2 Πειραματικά δεδομένα από τη Διεθνή Βιβλιογραφία

Η δεύτερη φάση συλλογής δεδομένων λαμβάνει χώρα με τη διεξαγωγή *βιβλιογραφικής έρευνας* που σκοπό έχει την καταγραφή επιτυχημένων και αποτυχημένων συνθέσεων ΑΣΚ. Σύμφωνα με τη Ενότητα 3, αυτού του είδους η καταγραφή δεδομένων είναι εξίσου σημαντική με την πειραματική καταγραφή δεδομένων που αναλύθηκε προηγουμένως, με τη διαφορά ότι η πιθανότητα να λάβει χώρα κάποιο σημαντικό λάθος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι αρκετά μεγαλύτερη από την περίπτωση των πειραματικών διαδικασιών. Συνεπώς, είναι σημαντικό οι κανόνες επιλογής αλλά και επεξεργασίας μίας σύνθεσης κονιάματος από μία δημοσίευση, να ακολουθούνται πάντα και προσεκτικά.

Όσον αφορά στη διαδικασία επιλογής συνθέσεων, θα πρέπει να επιλέγονται σε πρώτη φάση *συνθέσεις* που αφορούν αποκλειστικά και μόνο *κονιάματα*. Μία βάση δεδομένων για σύνθεση σκυροδέματος θα περιελάμβανε διαφορετικό είδος και πλήθος εισερχόμενων παραμέτρων από τις παραμέτρους που αναλύθηκαν στην Ενότητα 3. Στη συνέχεια, θα πρέπει οι συνθέσεις αυτές, να αφορούν μίγματα που περιέχουν *ένα ή κανένα είδος πρόσθετου υλικού*. Δυαδικά ή τριαδικά μίγματα κονιαμάτων απορρίπτονται εκτός εάν είναι γνωστή η κοκκομετρική διαβάθμιση, η ειδική επιφάνεια, το ειδικό βάρος και η σφαιρικότητα του *μίγματος* των πληρωτικών υλικών. Τα μίγματα κονιαμάτων που περιέχουν τις πληροφορίες αυτές για κάθε πληρωτικό υλικό χωριστά, δεν μπορούν να εισαχθούν στη βάση δεδομένων καθώς, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, οι εισερχόμενες παράμετροι θα έπρεπε να είναι διαφορετικές σε αριθμό. Τέλος, αφού οι συνθέσεις αφορούν κονιάματα που περιέχουν ένα είδος πληρωτικού υλικού, θα πρέπει κατά κύριο λόγο να αξιολογούνται ρεολογικά σύμφωνα με τον EFNARC, δηλαδή σύμφωνα με τη μικρή δοκιμή εξάπλωσης και τη μικρή δοκιμή χοάνης V, προκειμένου να συνάδουν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σε περίπτωση που βρεθούν μίγματα τα οποία δεν ελέγχονται σύμφωνα με τις εν λόγω δοκιμές, αλλά υποβάλλονται σε δοκιμή Marsh-cone για παράδειγμα, σημειώνονται προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για μετέπειτα έλεγχο του αλγορίθμου που πρόκειται να δημιουργηθεί.

Για κάθε μίγμα, λοιπόν, που πληροί τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν, λαμβάνει χώρα η καταγραφή των 21 ζητούμενων παραμέτρων στον τελικό πίνακα δεδομένων. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, κάποιες παράμετροι δεν αναφέρονται στην εκάστοτε βιβλιογραφία (χρωματισμένα κελιά στους Πίνακες των Παραρτημάτων). Σε αντίθεση με τα πειραματικά δεδομένα, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι άμεσος ο πειραματικός υπολογισμός τους και χρειάζεται μια διαφορετική προσέγγιση. Προκειμένου να μην υπάρχουν κενά κελιά στον τελικό πίνακα, ανάλογα με την περίπτωση του κενού γίνεται η συμπλήρωση ως εξής:

1. *Τιμή παραμέτρου για την οποία γίνεται αναφορά στη βιβλιογραφία μέσω κάποιου κανονισμού, ή απουσία παραμέτρου που μπορεί να οριστεί από κάποιον κανονισμό*: Υπάρχουν δημοσιεύσεις που αναφέρουν ότι η ιδιότητα ενός συστατικού υλικού ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο κανονισμό, δίχως αυτή να αναγράφεται. Στην περίπτωση αυτή, το συγκεκριμένο κενό της ιδιότητας-παραμέτρου συμπληρώνεται σύμφωνα με τον αντίστοιχο κανονισμό. Επιπλέον, υπάρχουν δημοσιεύσεις στις οποίες δεν γίνεται καμία αναφορά περί κάποιας παραμέτρου των συστατικών υλικών. Τότε, εφόσον υπάρχει συγκεκριμένη οδηγία από κάποιο κανονισμό για τον ορισμό της, συμπληρώνεται σύμφωνα με

αυτόν. Ορισμένες παράμετροι που μπορεί να ανήκουν στις 2 κατηγορίες είναι οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των λεπτόκοκκων αδρανών και των προσθέτων, καθώς και η μέγιστη διάμετρος των αδρανών (που υπολογίζεται σύμφωνα με τη διάσταση του μικρότερου κόσκινου από το οποίο διέρχεται το 95% τουλάχιστον της ποσότητας του αδρανούς) αντίστοιχα.

2. *Τιμή παραμέτρου η οποία μπορεί να βρεθεί σε διαφορετική βιβλιογραφική πηγή:* Εφόσον το προηγούμενο βήμα δεν είναι δυνατό να υλοποιηθεί, αναζητούνται δημοσιεύσεις για τις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια συστατικά υλικά, τα οποία περιγράφονται από την ιδιότητα που απουσιάζει από την αρχική βάση δεδομένων. Τότε το κενό συμπληρώνεται σύμφωνα με αυτή την τιμή. Τέτοιες παράμετροι συνήθως είναι ξανά η κοκκομετρία του προσθέτου ή η ειδική του επιφάνεια, καθώς επίσης πολύ συχνά είναι και οι εικόνες SEM του συγκεκριμένου συστατικού υλικού, οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε να προκύψει η σφαιρικότητα του προσθέτου κατόπιν επεξεργασίας.
3. *Τιμή παραμέτρου η οποία μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά στο εργαστήριο:* Όταν οι δύο προηγούμενες περιπτώσεις δεν είναι δυνατό να βρεθούν, ή απλά κάποιες παράμετροι έχουν ήδη υπολογιστεί στο εργαστήριο κατά τη διαδικασία παρασκευής κονιάματος, χρησιμοποιούνται οι τιμές αυτές για τη συμπλήρωση των κενών. Συνήθως τα κενά αυτά αφορούν κοκκομετρίες πληρωτικών υλικών, όπως είναι ο ζεόλιθος και ο καολίνης.
4. *Τιμή παραμέτρου για την οποία είτε δεν αναφέρεται κανένα στοιχείο είτε μπορεί να λάβει μία πληθώρα τιμών:* Υπάρχουν περιπτώσεις δημοσιεύσεων οι οποίες χρησιμοποιούν συνηθισμένα συστατικά υλικά αλλά δεν αναφέρουν ορισμένες ιδιότητές τους, ή περιγράφουν ένα συστατικό τους υλικό μονάχα με το όνομά του. Στην πρώτη περίπτωση, εφόσον το υλικό είναι συνηθισμένο, η τιμή που μπορεί να λάβει κάποια παράμετρος του δεν είναι συγκεκριμένη, αλλά κυμαίνεται μέσα σε ένα στενό εύρος τιμών, το οποίο έχει οριστεί από άλλες δημοσιεύσεις που χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό. Στη δεύτερη περίπτωση, η περιγραφή του υλικού που γίνεται μόνο από το όνομά του δεν είναι αρκετή προκειμένου να βρεθούν επακριβώς οι παράμετροι που το περιγράφουν. Συνεπώς, και στις δύο περιπτώσεις, επιλέγεται οι παράμετροι που λείπουν να συμπληρωθούν από το μέσο όρο των ήδη υπάρχοντων, στη βάση δεδομένων, αντίστοιχων μεγεθών. Τέτοιες παράμετροι είναι όλες οι παράμετροι κάποιας άμμου που απλά αναφέρεται ότι προέρχεται από κοίτες ποταμού, ή η ειδική επιφάνεια τσιμέντου τύπου I ή ιπτάμενης τέφρας.

Τα τελευταία κενά που πρέπει να καλυφθούν, αφορούν την περίπτωση που μία μελέτη σύνθεσης κονιάματος δεν περιλαμβάνει την προσθήκη πρόσθετου υλικού. Στην περίπτωση αυτή, όλες οι παράμετροι που αφορούν τα πρόσθετα σημαίνονται με μηδέν. Στο αλγόριθμο ΤΝΔ, δεν μπορεί να εισέλθει σειρά δεδομένων με κενά στοιχεία, επομένως ακολουθείται η συγκεκριμένη μέθοδος.

3.3 Μοντελοποίηση

Προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο μοντέλο το οποίο θα ορίζει εάν ένα μίγμα κονιάματος αποτελεί ΑΣΚ σύμφωνα με τα ρεολογικά του χαρακτηριστικά, έλαβαν χώρα πολλές δοκιμές μοντελοποίησης. Σε αυτές, οι υπερπαραμέτροι *πλάτος* και *βάθος* ΤΝΔ καθώς και το *batch size*, *πλήθος εποχών* και ο *ρυθμός εκμάθησης* (βλ Ενότητα 2.3.2), έλαβαν διαφορετικές τιμές, ανάλογες με τα αποτελέσματα της ακρίβειας της πρόβλεψης των δεδομένων επικύρωσης (validation data) που προκύπτουν σε κάθε απόπειρα εκμάθησης του

αλγορίθμου. Για να ξεκινήσει όμως αυτή η διαδικασία της βελτιστοποίησης, θα πρέπει στο αρχικό μοντέλο να οριστούν οι πρώτες υπερπαραμέτροί του.

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που περιγράφηκε στην Ενότητα 1.2, καταγράφηκαν οι τιμές που έχουν οριστεί για κάθε *υπερπαραμέτρο* των μοντέλων ΤΝΔ που αναπτύχθηκαν, καθώς επίσης και οι μέθοδοι με τις οποίες κάθε ερευνητική ομάδα επεξεργάστηκε τα εισερχόμενα δεδομένα της. Μία πρώτη αξιολόγηση της καταγραφής αποτελεί το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν, σε ίδια συχνότητα, δύο είδη *συναρτήσεων ενεργοποίησης* στους νευρώνες που βρίσκονται στα *κρυμμένα επίπεδα*, η *συνάρτηση ReLu* (σχέση (1.4)) και η *σιγμοειδής συνάρτηση* (σχέση (1.2)). Λόγω της μορφής της γραφικής τους παράστασης, κάθε μία από αυτές τις συναρτήσεις ενεργοποίησης ταιριάζει καλύτερα με συγκεκριμένο τρόπο κανονικοποίησης των εισερχομένων δεδομένων. Η συνάρτηση *ReLu*, για παράδειγμα, ταιριάζει καλύτερα με τη *μέθοδο κανονικοποίησης ελάχιστης και μέγιστης τιμής* του δείγματος της κάθε παραμέτρου (σχέση (1.6)), καθώς για τιμές μεταβλητής μικρότερες από το μηδέν, λαμβάνει μηδενική τιμή, ενώ για τιμές μεταβλητής μεγαλύτερες από το μηδέν, έχει μόνο θετικές τιμές. Η συγκεκριμένη μέθοδος κανονικοποίησης με τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές, μετατρέπει το κάθε σετ παραμέτρων σε σετ θετικών τιμών, επομένως, όταν θα εισέρχονται από την συνάρτηση ενεργοποίησης *ReLu*, δεν θα προκύπτουν μηδενικές τιμές οπότε και ο αλγόριθμος θα «κινείται» πιο εύκολα. Αντίστοιχη λογική ακολουθείται και κατά το συνδυασμό της *σιγμοειδούς συνάρτησης ενεργοποίησης*, στους νευρώνες των κρυφών επιπέδων, με τη *μέθοδο κανονικοποίησης μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης* του δείγματος της κάθε παραμέτρου (σχέση (1.5)). Στην περίπτωση αυτή, οι τελικές εισερχόμενες κανονικοποιημένες παράμετροι παίρνουν θετικές και αρνητικές τιμές, και η συνάρτηση ενεργοποίησης ορίζεται σε όλο το μήκος του άξονα των x . Συνεπώς, επιλέγεται να σχεδιαστεί όχι ένα *αρχικό μοντέλο*, αλλά *δύο*, που μοναδική διαφορά θα έχουν τον τρόπο κανονικοποίησης των δεδομένων, καθώς και το είδος της συνάρτησης ενεργοποίησης στους *νευρώνες των κρυμμένων επιπέδων*. Οι *νευρώνες του επιπέδου εξερχομένων*, επιλέγεται να περιέχουν ως συνάρτηση ενεργοποίησης τη *σιγμοειδή συνάρτηση*, δεδομένου ότι όλες οι βιβλιογραφικές αναφορές συμφωνούσαν σε αυτήν την επιλογή, αφού αυτή η συνάρτηση χρησιμοποιείται προκειμένου να προβλέψει την πιθανότητα μία δυαδική μεταβλητή να πάρει την τιμή 1 (Goodfellow et al, 2016). Συγκεντρωτικά, τα δύο αρχικά μοντέλα που επιλέχθηκαν σύμφωνα με τη βιβλιογραφία περιγράφονται, σε πρώτη φάση, από τα ακόλουθα μεγέθη:

1. Πρώτο μοντέλο

- a. κανονικοποίηση εισερχομένων δεδομένων: *κανονικοποίηση min και max τιμής του δείγματος της κάθε παραμέτρου*
- b. συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων κρυφών επιπέδων: *συνάρτηση ReLu*
- c. συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων επιπέδων εξερχομένων: *σιγμοειδής συνάρτηση*

2. Δεύτερο μοντέλο

- a. κανονικοποίηση εισερχομένων δεδομένων: *κανονικοποίηση mean και std τιμής του δείγματος της κάθε παραμέτρου*
- b. συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων κρυφών επιπέδων: *σιγμοειδής συνάρτηση*
- c. συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων επιπέδων εξερχομένων: *σιγμοειδής συνάρτηση*

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά ενός μοντέλου ΤΝΔ, που αφορούν την κατανομή των εισερχομένων δεδομένων σε δεδομένα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου, καθώς και τις υπερπαραμέτρους του, είναι κοινά στις περιπτώσεις των δύο αρχικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Τα χαρακτηριστικά αυτά, σύμφωνα με την καταγραφή των τιμών των υπερπαραμέτρων των μοντέλων ΤΝΔ της βιβλιογραφίας, παρατίθενται στη ακόλουθη λίστα:

1. δεδομένα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου: 70%, 15% και 15% επί του συνόλου των εισερχομένων δεδομένων, που αξιολογούνται με γνώμονα τους κανόνες της EFNARC, αντίστοιχα, σύμφωνα με την πλειοψηφία των δημοσιεύσεων (η επιλογή των δεδομένων που θα καταταχθούν σε οποιαδήποτε από αυτές τις τρεις κατηγορίες δεδομένων, αποτελεί μία τυχαία διαδικασία την οποία εκτελεί μόνος του ο αλγόριθμος)
2. βάθος, δηλαδή πλήθος κρυφών επιπέδων: ένα (1) κρυμμένο επίπεδο, σύμφωνα με την πλειοψηφία των δημοσιεύσεων
3. πλάτος, δηλαδή πλήθος νευρώνων ανά κρυφό επίπεδο: πέντε (5) νευρώνες στο κρυφό επίπεδο, σύμφωνα με την σχέση (1.7) των Onyari et al, εφόσον οι εισερχόμενες παράμετροι στο πρώτο επίπεδο του αλγορίθμου είναι 21 και οι εξερχόμενες παράμετροι στο ίδιο επίπεδο είναι 1 ($\sqrt{21*1} \approx 5$)
4. ρυθμός εκμάθησης: 0.04, σύμφωνα με τους Siddique et al
5. batch size: 32, μία σχετικά αυθαίρετη επιλογή τιμής καθώς δεν αναφέρονταν το συγκεκριμένο μέγεθος σε καμία από τις δημοσιεύσεις που ερευνήθηκαν
6. πλήθος εποχών: 400 εποχές, ή επαναλήψεις, σύμφωνα με τον μέσο όρο των καταγραφών χαρακτηριστικών ΤΝΔ, που αφορούν το πλήθος εποχών

Θα πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι στη βιβλιογραφία που μελετήθηκε, δεν υπήρξε κάποιο πρόβλημα ταξινόμησης για το οποίο η μέθοδος ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να το επιλύσει. Όλες οι δημοσιεύσεις αφορούσαν προβλήματα παλινδρόμησης, για το λόγο αυτό αναμένονται τα δύο αρχικά μοντέλα που μόλις ορίστηκαν να μην έχουν τις βέλτιστες δυνατές υπερπαραμέτρους, για αυτό και καλούνται αρχικά μοντέλα.

Εφόσον ο προσδιορισμός της επεξεργασίας των εισερχόμενων δεδομένων στον αλγόριθμο και ο προσδιορισμός των υπερπαραμέτρων αυτού ολοκληρώθηκε στις προηγούμενες γραμμές, μένει μονάχα η επιλογή του προγραμματιστικού περιβάλλοντος στο οποίο πρόκειται να αναπτυχθεί ο αλγόριθμος ΤΝΔ. Κατάλληλη γλώσσα προγραμματισμού για την ανάπτυξη μοντέλου ΤΝΔ αποτελεί η *Python*, μιας και έχει πολλές «βιβλιοθήκες» αλγορίθμων που διευκολύνουν ιδιαίτερα αρκετές συνηθισμένες εργασίες, ενώ η ταχύτητα εκμάθησής της είναι υψηλή. Ορισμένες από τις βιβλιοθήκες της που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία είναι η *Pandas*, η οποία αφορά τον τομέα της ανάλυσης δεδομένων (data analysis), η *NumPy*, η οποία αφορά τον τομέα της Αριθμητικής Ανάλυσης (Numerical analysis), η *scikit-learn*, η οποία αποτελεί βιβλιοθήκη που αφορά τη μηχανική μάθηση (Machine Learning), και η *Keras*, η οποία αφορά συγκεκριμένα την τεχνική των ΤΝΔ (Artificial Neural Networks).

Τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του αλγορίθμου ΤΝΔ, αποτελεί ο ορισμός της μεθόδου υπολογισμού της μετρικής, εμπειρικό σφάλμα, καθώς και ο ορισμός της μεθόδου ελαχιστοποίησης, δηλαδή βελτιστοποίησής του. Όπως αναφέρεται αναλυτικά στην Ενότητα 2.3.3, η Συνάρτηση Εμπειρικού Κόστους εκφράζεται με τη βοήθεια της συνάρτησης κόστους *Binary Cross Entropy*, ενώ η ελαχιστοποίησή του που προκύπτει από τη βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων του δικτύου επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο *Adam*

Optimizer. Με το πέρας του βήματος αυτού, το μοντέλο είναι έτοιμο να ξεκινήσει να «τρέχει».

Κατά τη συλλογή δεδομένων από τη βιβλιογραφική έρευνα (Ενότητα 3.2), συλλέχθηκαν και δεδομένα τα οποία αξιολογούνται ως προς την αυτοσυμπυκνωσιμότητά τους από μεθόδους διαφορετικές αυτών που περιλαμβάνονται στις οδηγίες EFNARC. Τα συγκεκριμένα δεδομένα δεν απορρίπτονται από την λίστα, αλλά φυλάσσονται ώστε να χρησιμοποιηθούν με το πέρας της βελτιστοποίησης του αλγορίθμου ΤΝΔ. Με τη βελτιστοποίησή του, προκύπτει το μοντέλο εκείνο το οποίο χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη ακρίβεια και την ελάχιστη, κατά το δυνατόν, προσαρμογή στα δεδομένα εκμάθησης, δηλαδή το φαινόμενο της υπερεκπαίδευσης είναι περιορισμένο κατά το μέγιστο. Για το λόγο αυτόν, επιλέγεται τα συγκεκριμένα δεδομένα να εισαχθούν στο μοντέλο, για ένα εμπρόσθιο πέραςμα του αλγορίθμου, ώστε να προκύψει ένας ακόμα δείκτης ακρίβειας.

4 Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Με την ολοκλήρωση των πειραματικών διαδικασιών παρασκευής ΑΣΚ, συνολικά παρασκευάστηκαν 9 επιτυχημένες συνθέσεις ΑΣΚ και 69 μη αποδεκτές. Με την ολοκλήρωση της βιβλιογραφικής έρευνας, συνολικά συλλέχθηκαν 150 συνθέσεις ΑΣΚ αξιολογημένες σύμφωνα με τον EFNARC, εκ των οποίων οι 104 είναι επιτυχημένες συνθέσεις και οι 46 είναι μη αποδεκτές συνθέσεις ΑΣΚ, και 26 συνθέσεις ΑΣΚ αξιολογημένες σύμφωνα με διαφορετικές μεθόδους αξιολόγησης, εκ των οποίων οι 10 είναι επιτυχημένες συνθέσεις και οι 17 είναι μη αποδεκτές συνθέσεις ΑΣΚ. Επομένως, για την πρώτη ομάδα αποτελεσμάτων που αφορούν την εκπαίδευση και την βελτιστοποίηση του μοντέλου ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 228 συνθέσεις ΑΣΚ, και για τη δεύτερη φάση αποτελεσμάτων που αφορούν τον επανέλεγχο του μοντέλου ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν 26 συνθέσεις ΑΣΚ. Στα Παραρτήματα της εργασίας, φαίνεται αναλυτικά η λίστα με όλες αυτές τις συνθέσεις και τις παραμέτρους που τις περιγράφουν. Εκεί, στην πρώτη ομάδα δεδομένων, κάθε κατηγορία της (πειραματικά και βιβλιογραφικά δεδομένα) είναι χωρισμένη σε δύο μέρη από μία οριζόντια διακεκομμένη ευθεία γραμμή. Τα δεδομένα που βρίσκονται κάτω από τη συγκεκριμένη γραμμή, αποτελούν τα πρώτα δεδομένα ελέγχου του αλγορίθμου και βρίσκονται εκεί ώστε να διαχωρίζονται από τα δεδομένα εκμάθησης και επικύρωσης. Σε ακόλουθο παράρτημα, παρατίθεται και το δεύτερο σετ δεδομένων ελέγχου, που περιλαμβάνει τις συνθέσεις που δεν αξιολογήθηκαν σύμφωνα με την EFNARC.

Σύμφωνα με την Ενότητα 3.3, σχεδιάστηκαν 2 αρχικά μοντέλα προκειμένου να βελτιστοποιηθούν, που διαφέρουν μόνο ως προς τον τρόπο κανονικοποίησης των δεδομένων και το είδος της συνάρτησης ενεργοποίησης στους νευρώνες των κρυμμένων επιπέδων τους. Η διαδικασία της βελτιστοποίησής τους χρειάστηκε τη μελέτη 2 επιπλέον μοντέλων με διαφορετικές παραμέτρους, σε κάθε περίπτωση. Συνολικά δηλαδή, έλαβε χώρα ανάλυση 6 διαφορετικών μοντέλων ΤΝΔ, από τα οποία επιλέχθηκε το βέλτιστο. Στο μοντέλο αυτό, ως τελευταίο βήμα αντικαταστάθηκαν τα δεδομένα ελέγχου της πρώτης ομάδας αποτελεσμάτων, από τα συνολικά δεδομένα της δεύτερης, κι έτσι έλαβε χώρα μια δεύτερη αξιολόγηση του μοντέλου.

4.1 Ακρίβεια Μοντέλου

Στον Πίνακα 5 που ακολουθεί, παρουσιάζεται των σύνολο των υπερπαραμέτρων των 6 μοντέλων ΤΝΔ που αναπτύχθηκαν με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου, το οποίο προβλέπει με το ελάχιστο δυνατό σφάλμα εάν οποιαδήποτε σύνθεση κονιάματος αποτελεί σύνθεση ΑΣΚ. Τα μοντέλα 1 και 4, είναι τα αρχικά μοντέλα που ορίστηκαν στις Ενότητες 3.3 και 4. Τα μοντέλα 2 και 3 προέρχονται από διαδοχικές αλλαγές των υπερπαραμέτρων του μοντέλου 1, και, αντίστοιχα, τα μοντέλα 5 και 6 από διαδοχικές αλλαγές του μοντέλου 4. Παρατηρείται πως οι αλλαγές αυτές αφορούν αύξηση στον αριθμό των νευρώνων στα κρυφά επίπεδα και μείωση του αριθμού των εποχών, όπως επίσης και του ρυθμού εκμάθησης του αλγορίθμου.

Πίνακας 5 Υπερπαράμετροι για καθένα από τα 6 μοντέλα που αναλύθηκαν.

Μοντέλο	κρυφά επίπεδα	νευρώνες ανά κρυφό επίπεδο	batch size	πλήθος εποχών	ρυθμός εκμάθησης	είδος κανονικοποίησης	συνάρτηση ενεργοποίησης κρυφών επιπέδων	συνάρτηση ενεργοποίησης επιπέδου εξόδου
1	1	5	32	400	0.04	min-max	relu	sigmoid
2	1	42	32	200	0.004	min-max	relu	sigmoid
3	2	42-42	32	100	0.004	min-max	relu	sigmoid
4	1	5	32	400	0.04	mean-std	sigmoid	sigmoid
5	1	42	32	200	0.004	mean-std	sigmoid	sigmoid
6	2	42-42	32	100	0.004	mean-std	sigmoid	sigmoid

Η απόφαση για την υλοποίηση αλλαγών των υπερπαραμέτρων ενός μοντέλου ΤΝΔ, λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την Ενότητα 2.3.3, με τις καμπύλες εμπειρικού σφάλματος και ακρίβειας της ταξινόμησης, σε συνάρτηση με το πλήθος εποχών-επαναλήψεων ενός αλγορίθμου ΤΝΔ, ελέγχοντας εάν το μοντέλο που αξιολογείται χαρακτηρίζεται από υπερεκπαίδευση ή όχι. Στην Εικόνα 25 που ακολουθεί, απεικονίζεται η πρώτη περίπτωση καμπύλης για κάθε ένα μοντέλο από το 1 έως το 6 (Εικόνα 25 (α)–(στ), αντίστοιχα).

Παρατηρείται ότι το *Μοντέλο 1* (Εικόνα 25 (α)), χαρακτηρίζεται από υπερβολικά μεγάλη *διακύμανση του εμπειρικού σφάλματος* που προέκυψε για τα δεδομένα εκπαίδευσης και επικύρωσης του αλγορίθμου, παρά το γεγονός ότι οι δύο τιμές μοιάζουν να βρίσκονται πολύ κοντά. Επιπλέον, ο *ρυθμός εκμάθησης* του συγκεκριμένου μοντέλου είναι πολύ μεγάλος, με αποτέλεσμα να δημιουργεί δυσκολία σύγκλισης του αλγορίθμου στη βέλτιστη δυνατή ομάδα παραμέτρων. Στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγει και το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται λίγοι νευρώνες στο κρυφό επίπεδο, σε σύγκριση με τα εισερχόμενα δεδομένα σε καθένα από αυτούς.

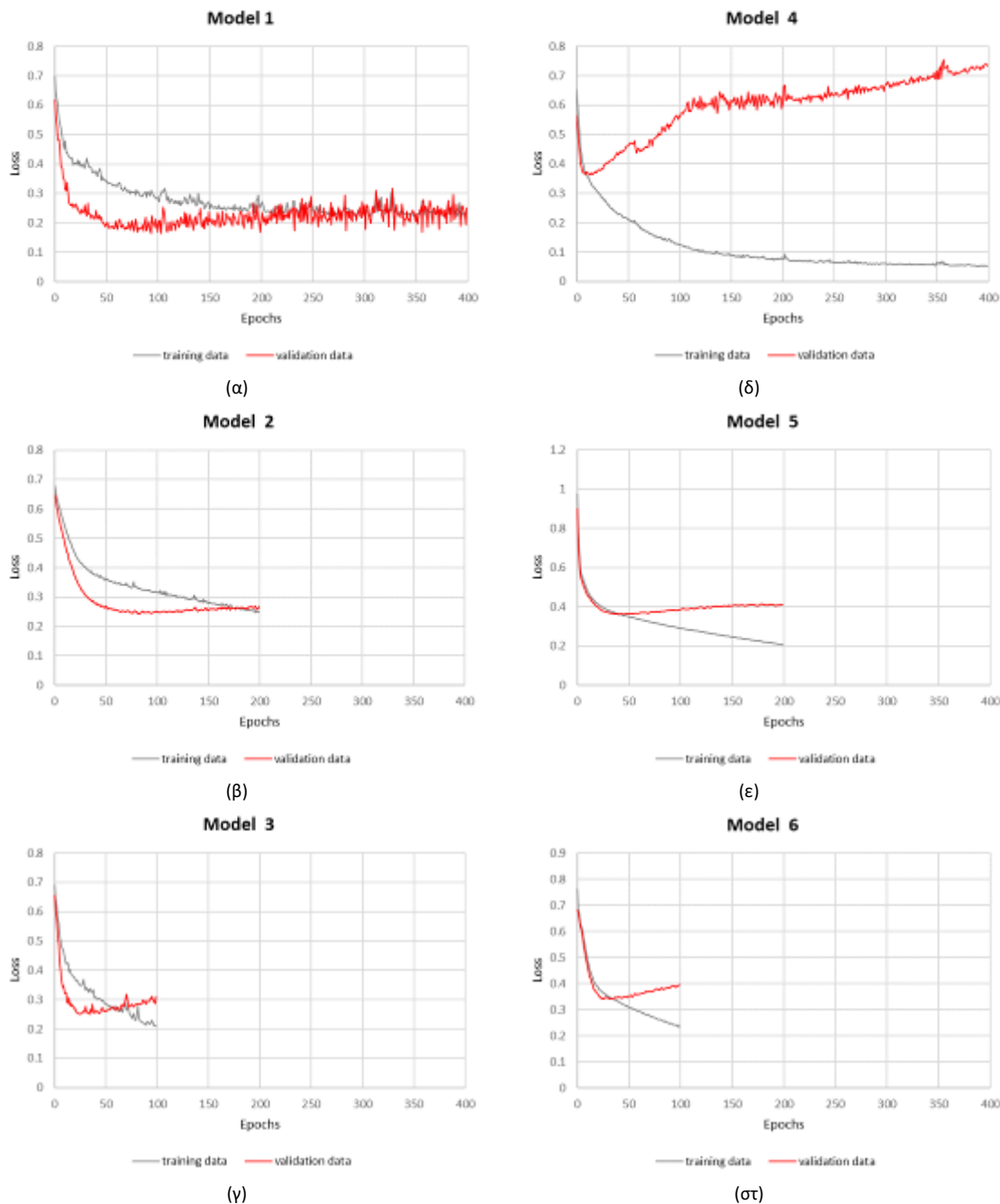
Το *Μοντέλο 2* (Εικόνα 25 (β)), είναι σχεδιασμένο με *υποδεκαπλάσιο ρυθμό εκμάθησης* και με *υπερδεκαπλάσιους*, σε αριθμό, *νευρώνες* στο κρυφό επίπεδο του συγκριτικά με την περίπτωση του Μοντέλου 1, γεγονός που οδηγεί στην επιλογή *μικρότερου πλήθους εποχών*. Η *διακύμανση του εμπειρικού σφάλματος* αυτή τη φορά είναι σημαντικά μικρότερη και δεν υπάρχει κίνδυνος *υπερεκπαίδευσης* του αλγορίθμου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η *ταχύτητα της εκπαίδευσης* του μοντέλου ήταν μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση.

Το *Μοντέλο 3* (Εικόνα 25 (γ)) διαφέρει από το Μοντέλο 2 στον *αριθμό των κρυμμένων επιπέδων*, κι επομένως και στον *αριθμό των συνολικών νευρώνων* του δικτύου, καθώς και στο *πλήθος των εποχών*. Τα κρυφά επίπεδα και οι νευρώνες τους πλήθυναν, ενώ ο αριθμός των εποχών μειώθηκε. Η *διακύμανση του εμπειρικού σφάλματος* προέκυψε παρόμοια με αυτήν του Μοντέλου 2, ο *υπολογιστικός χρόνος* μειώθηκε κατακόρυφα, ενώ οριακά δεν υπάρχει πρόβλημα *υπερεκπαίδευσης*.

Το *Μοντέλο 4* (Εικόνα 25 (δ)), τα χαρακτηριστικά του οποίου αντιστοιχούν πλήρως στο Μοντέλο 1 με τη διαφορά της συνάρτησης ενεργοποίησης, παρουσιάζει *μεγάλη διακύμανση του εμπειρικού σφάλματος*, αλλά σε λίγο μικρότερη ένταση από αυτήν του Μοντέλου 1. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρατηρείται *υπερεκπαίδευση* του αλγορίθμου ΤΝΔ, μιας και η καμπύλη που αντιστοιχεί στα δεδομένα επικύρωσης έχει ανοδικές τάσεις και είναι απομακρυσμένη από την καμπύλη που αντιστοιχεί στα δεδομένα εκπαίδευσης.

Το *Μοντέλο 5* (Εικόνα 25 (ε)), έχει τις ίδιες υπερπαραμέτρους με αυτές που έχει και το Μοντέλο 2. Η καμπύλη του εμπειρικού του σφάλματος είναι φανερά πιο ομαλή από αυτή του Μοντέλου 4 αλλά και του αντίστοιχού του, Μοντέλου 2, ενώ ο κίνδυνος *υπερεκπαίδευσης* εξακολουθεί να υφίσταται.

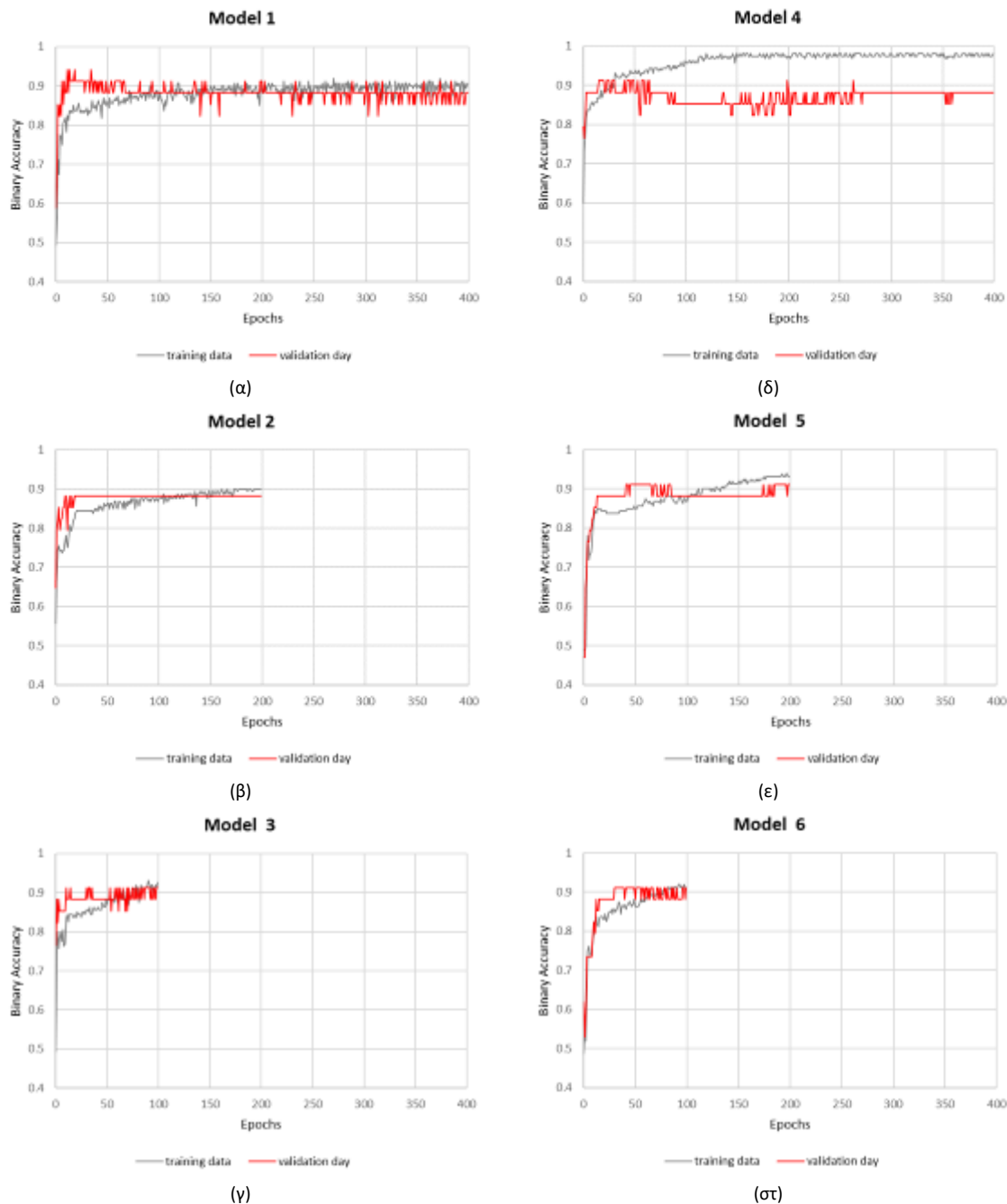
Τέλος, το *Μοντέλο 6* (Εικόνα 25 (στ)), αντίστοιχο του Μοντέλου 3, δίνει μία καμπύλη εμπειρικού σφάλματος εξίσου ομαλή με αυτή του Μοντέλου 5, ενώ ο υπολογιστικός χρόνος ήταν ο πιο γρήγορος από κάθε άλλη διαδικασία. Ο κίνδυνος *υπερεκπαίδευσης* οριακά δεν υφίσταται.



Εικόνα 25 (α) - (στ) Καμπύλες εμπειρικού σφάλματος σε συνάρτηση με το πλήθος εποχών-επαναλήψεων των αλγορίθμου ΤΝΔ των Μοντέλων 1 έως 6, αντίστοιχα (διαγράμματα Loss-epochs).

Στις Εικόνα 26 (α) – (στ) που ακολουθούν, απεικονίζεται η δεύτερη περίπτωση καμπύλης για κάθε ένα μοντέλο από το 1 έως το 6, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά, έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα της Εικόνα 25, αφού περιγράφουν τα ίδια χαρακτηριστικά για κάθε Μοντέλο. Συγκεκριμένα, τα *Μοντέλα 4* και *5* (Εικόνες 26 (δ) και (ε), αντίστοιχα), εφόσον οι ακρίβειες για τα δεδομένα εκπαίδευσης και επικύρωσής τους δεν ταυτίζονται μεταξύ τους, με την ακρίβεια των δεδομένων εκπαίδευσης να είναι μεγαλύτερη

από την ακρίβεια των δεδομένων επικύρωσης, χαρακτηρίζονται από *υπερεκπαίδευση*. Όσον αφορά στα υπόλοιπα Μοντέλα, 1-3 και 6 (Εικόνες 26 (α) – (γ) και (στ)), οι δύο μετρικές αυτές είναι περίπου ίσες μεταξύ τους, ανά περίπτωση Μοντέλου, οδηγώντας στο συμπέρασμα πως δεν αποτελούν *υπερεκπαιδευμένους αλγορίθμους*.



Εικόνα 26 (α) - (στ) Καμπύλες ακρίβειας ταξινόμησης σε συνάρτηση με το πλήθος εποχών-επαναλήψεων των αλγορίθμου ΤΝΔ των Μοντέλων 1 έως 6, αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 6 που ακολουθεί, παρουσιάζονται η ακρίβεια του μοντέλου κατά τη διαδικασία επικύρωσής του (το συγκεκριμένο μέγεθος απεικονίστηκε και υπό μορφή διαγράμματος στην Εικόνα 26), και η ακρίβειά του κατά τη διαδικασία του ελέγχου του. Η *ακρίβεια* του κάθε Μοντέλου ΤΝΔ κατά τη *διαδικασία επικύρωσής του*, προκύπτει ως η μέγιστη τιμή της κόκκινης καμπύλης σε κάθε περίπτωση της Εικόνα 26, σε μία περιοχή κοντά στο πέρας των επαναλήψεων της διαδικασίας της εκπαίδευσης. Τα Μοντέλα 1, 2 και

4, εμφάνισαν τη μικρότερη ακρίβεια επικύρωσης, ενώ τα Μοντέλα 2, 5 και 6 την υψηλότερη. Η ακρίβεια του κάθε Μοντέλου ΤΝΔ κατά τη διαδικασία του ελέγχου του, προκύπτει ως ο αριθμός των ορθών προβλέψεων των δεδομένων ελέγχου, προς το σύνολο αυτών (Σχέση 2.23). Το Μοντέλο 1, εμφάνισε τη μικρότερη ακρίβεια ελέγχου, ενώ τα Μοντέλα 5 και 6 την υψηλότερη.

Πίνακας 6 Αποτελέσματα για την ακρίβειά των μοντέλων 1-6 σε επίπεδο δεδομένων επικύρωσης και ελέγχου.

Μοντέλο	ακρίβεια δεδομένων επικύρωσης	λανθασμένες προβλέψεις στα δεδομένα ελέγχου	ακρίβεια δεδομένων ελέγχου
1	0.88	10/34	0.71
2	0.88	7/34	0.79
3	0.91	6/34	0.82
4	0.88	7/34	0.79
5	0.91	5/34	0.85
6	0.91	5/34	0.85

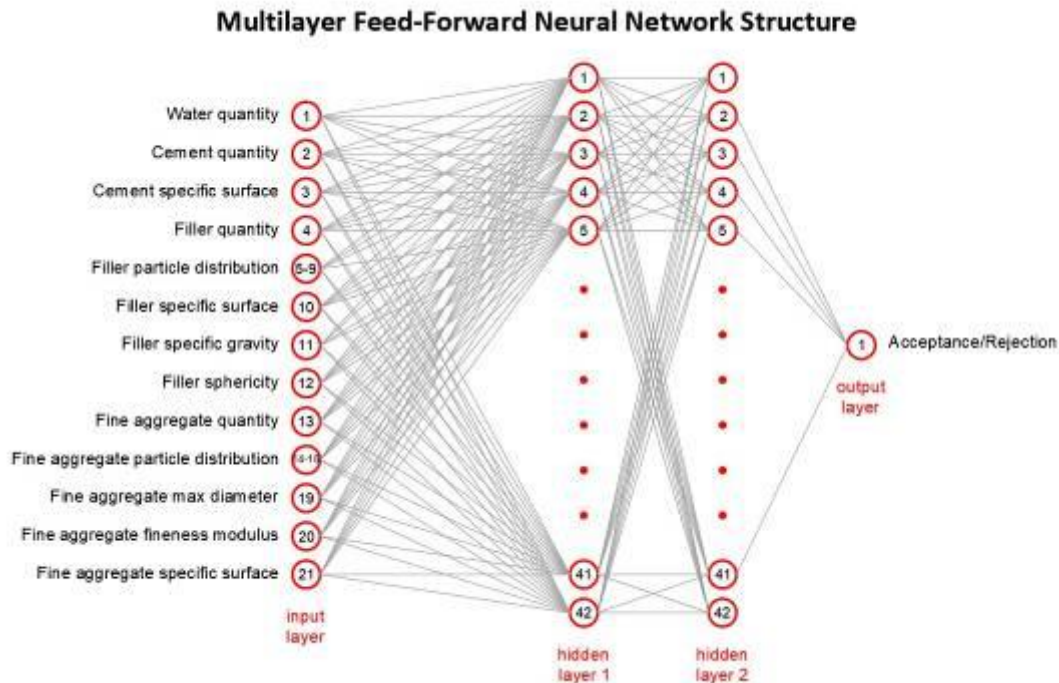
4.2 Αξιολόγηση υπερπαραμέτρων ΤΝΔ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Ενότητας 4.1, μία αύξηση του συνολικού πλήθους των νευρώνων σε ένα δίκτυο συγκριτικά με μία ταυτόχρονη μείωση, μικρότερης όμως κλίμακας, του ρυθμού εκμάθησης του αλγορίθμου, δημιουργεί έναν αλγόριθμο του οποίου η εκπαίδευση απαιτεί μικρότερο αριθμό εποχών-επαναλήψεων. Συνεπώς, η αύξηση του αριθμού των νευρώνων, έχει την τάση να ελαττώνει το πλήθος των απαιτούμενων εποχών και επομένως, με τη συγκεκριμένη μείωση, μειώνεται και ο υπολογιστικός χρόνος του αλγορίθμου. Επιπλέον, με τη μείωση του ρυθμού εκμάθησης, παρατηρήθηκε ότι τα τελικά διαγράμματα Loss(epochs) απέκτησαν μία περισσότερο ομαλή μορφή, η οποία διατηρήθηκε σχεδόν η ίδια παρά τις αλλαγές των άλλων υπερπαραμέτρων, σύμφωνα με τη σύγκριση των μοντέλων 2 με 3, και 5 με 6. Από διάφορες δοκιμές των υπερπαραμέτρων του δικτύου, οι οποίες δεν καταγράφηκαν στα αποτελέσματα καθώς αυτές αποτέλεσαν οδηγό για την δημιουργία του κάθε μοντέλου που παρουσιάστηκε, προέκυψε και το συμπέρασμα ότι η ελάττωση του ρυθμού εκμάθησης, όταν λαμβάνει χώρα μόνη της σε ένα δίκτυο, οδηγεί σε αύξηση των αριθμών των εποχών του. Το γεγονός αυτό, δεν παρατηρήθηκε προηγουμένως, όπου η ελάττωση του ρυθμού εκμάθησης έλαβε χώρα ταυτόχρονα με μεγαλύτερης κλίμακας αύξηση του αριθμού των νευρώνων, καθώς οι μεταβολές των δύο αυτών υπερπαραμέτρων επηρεάζουν με τον ακριβώς αντίθετο τρόπο τον αλγόριθμο. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε απόλυτη συμφωνία με τη θεωρία που βρίσκεται πίσω από έναν αλγόριθμο ΤΝΔ, η οποία αναλύθηκε στην Ενότητα 2.4.3.

4.3 Επιλογή βέλτιστου μοντέλου ΤΝΔ

Αναφορικά με το βέλτιστο εκ των έξι (6) μοντέλων ΤΝΔ που προέκυψαν, η επιλογή γίνεται σύμφωνα με το κριτήριο της ακρίβειας, σε συνδυασμό με την ταχύτητα υπολογισμού του αλγορίθμου. Το Μοντέλο 6 ικανοποιεί με επιτυχία και τα δύο αυτά κριτήρια, εφόσον

παρουσιάζει μία από τις μεγαλύτερες ακρίβειες επικύρωσης και ελέγχου, ενώ υπολογιστικά απαιτεί τον ελάχιστο χρόνο. Συνεπώς, για την επεξεργασία του δεύτερου σετ δεδομένων ελέγχου, τα οποία δεν αξιολογούνται σύμφωνα με την οδηγία της EFNARC, έγινε χρήση του Μοντέλου 6. Η διαγραμματική του απεικόνιση φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί



Εικόνα 27 Διαγραμματική απεικόνιση του Μοντέλου 6, το οποίο αποτελεί ένα Πρόσθιας Τροφοδότησης Πολυεπίπεδο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (Multilayer Feed-Forward Neural Network Structure). Στην εικόνα φαίνονται οι παράμετροι εισαγωγής του δικτύου, γραμμένες με τους αγγλικούς τους όρους, το πλάτος και το βάθος του δικτύου, καθώς και το επίπεδο εξόδου.

Με τη βοήθεια του Πίνακα 6, μπορεί να γίνει έμμεση σύγκριση μεταξύ της ακρίβειας επικύρωσης και της ακρίβειας ελέγχου. Σύμφωνα με την Ενότητα 2.3, μία *υψηλή ακρίβεια επικύρωσης* οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι υπερπαραμέτροι που επιλέχθηκαν για το δίκτυο, τείνουν προς τις βέλτιστες δυνατές τους τιμές. Μία *υψηλή ακρίβεια ελέγχου* δηλώνει ότι το μοντέλο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από υπερεκπαίδευση των δεδομένων εκπαίδευσης και επικύρωσης. Το ένα χαρακτηριστικό συνδέεται με το άλλο καθώς η βέλτιστη επιλογή υπερπαραμέτρων οδηγεί στη μείωση των φαινομένων υπερεκπαίδευσης. Στην περίπτωση του Μοντέλου 6, και οι δύο συγκεκριμένες μετρικές έχουν υψηλές σχετικές τιμές, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι έχει γίνει σωστή επιλογή υπερπαραμέτρων και δεν υπάρχει κίνδυνος υπερεκπαίδευσης.

4.4 Αποκλίσεις - Ειδικές Περιπτώσεις

Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης του αλγορίθμου, πέρα από τα αποτελέσματα που αφορούν τις υπερπαραμέτρους των υπό μελέτη μοντέλων ΤΝΔ, προέκυψαν και ορισμένα αποτελέσματα βασισμένα στη *σχέση μεταξύ ιδιοτήτων των συνθέσεων κονιαμάτων και επιτυχίας πρόβλεψης* της αυτοσυμπυκνωσιμότητας των συγκεκριμένων μοντέλων. Συγκεκριμένα, αναφορικά με το σετ δεδομένων ελέγχου του αλγορίθμου, παρατηρήθηκε πως οι *συνθέσεις που δεν περιείχαν καθόλου πρόσθετο-πληρωτικό υλικό* ήταν δύσκολο να

προβλεφθούν σωστά από τον αλγόριθμο. Χρειάστηκαν αρκετές αλλαγές στις υπερπαραμέτρους του προκειμένου να προβλεφθούν με επιτυχία όλες οι συνθέσεις που έχουν τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στο πρώτο σετ δεδομένων ελέγχου. Επιπλέον, μία ακόμα παρατήρηση αφορά το είδος των συνθέσεων που προβλέφθηκαν λανθασμένα. Σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου στο πρώτο σύνολο των εισερχομένων δεδομένων του, παρατηρήθηκε η μορφή που έχουν οι συνθέσεις που προβλέφθηκαν με αποτυχία. Κατά μέσο όρο, το 20% των συνθέσεων αυτών αφορούσαν συνθέσεις που αποτελούν *συνθέσεις ΑΣΚ*, το 20% αυτών αφορούσαν συνθέσεις που *δεν αποτελούν συνθέσεις ΑΣΚ*, ενώ το υπόλοιπο 60% αφορούσε συνθέσεις οι οποίες δεν χαρακτηρίζονται από την EFNARC ως συνθέσεις ΑΣΚ, αλλά *θεωρήθηκαν ως συνθέσεις ΑΣΚ* λόγω των ρεολογικών τους ιδιοτήτων. Αξίζει να σημειωθεί πως οι συνθέσεις των δύο πρώτων κατηγοριών αυτών χαρακτηρίζονται από *μικρότερη ποσότητα περιεχόμενου πρόσθετου-πληρωτικού υλικού*, σχετικά με όμοιες συνθέσεις τους οι οποίες προβλέφθηκαν με επιτυχία από τους αλγορίθμους, ενώ στην πρώτη μόνο περίπτωση, χαρακτηρίζονται και από *μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου*.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από το γεγονός ότι ο αλγόριθμος προέβλεψε με δυσκολία μίγματα που δεν περιέχουν καθόλου πρόσθετα-πληρωτικά υλικά, καθώς και από το γεγονός ότι ορισμένα μίγματα που αξιολογούνται αυστηρά σύμφωνα με την EFNARC και χαρακτηρίζονται από χαμηλή ποσότητα πρόσθετου-πληρωτικού υλικού, δεν ήταν δυνατό έπειτα από τις δοκιμές να προβλεφθούν σωστά, είναι το εξής: το κάθε μίγμα που ανήκει σε μία από τις δύο αυτές κατηγορίες, χαρακτηρίζεται ως ασταθές όσον αφορά στις ρεολογικές του ιδιότητες, οι οποίες καθορίζουν το χαρακτηρισμό του μίγματος ως αυτοσυμπυκνόμενο. Για το λόγο αυτόν, το μοντέλο των ΤΝΔ δεν μπορεί να εντάξει με σημαντική ακρίβεια στη γεννήτρια κατανομή των εισερχόμενων δεδομένων του τις συνθέσεις αυτές, με αποτέλεσμα να είναι πιο επιρρεπές σε κάποια λανθασμένη πρόβλεψή τους. Τα αποτελέσματα αυτά υποστηρίζονται από την Ενότητα 2.1.2, όπου αναλύεται ο ρόλος των πρόσθετων υλικών. Περιληπτικά, το συστατικό αυτό υλικό διατηρεί τη συνοχή του μίγματος του νωπού ΑΣΣ, και άρα και του νωπού ΑΣΚ, και μειώνει την αντίσταση στην απόμιξη, ελέγχοντας έτσι ιδιότητες, όπως είναι οι απαιτήσεις του μίγματος σε νερό και η σταθερότητά του.

Αντίστοιχο συμπέρασμα προκύπτει και για την περίπτωση η οποία αφορά στα μίγματα εκείνα που αξιολογούνται αυστηρά σύμφωνα με την EFNARC και χαρακτηρίζονται από *υψηλή ποσότητα τσιμέντου*. Ο αλγόριθμος δυσκολεύεται ξανά να εντάξει με σημαντική ακρίβεια στη γεννήτρια κατανομή των εισερχόμενων δεδομένων του τις συνθέσεις αυτές, οπότε αυξάνεται η πιθανότητα να τις αξιολογήσει λανθασμένα. Το γεγονός αυτό εξηγείται θεωρητικά αφού η αυξημένη ποσότητα τσιμέντου οδηγεί σε περισσότερο έντονες αντιδράσεις ενυδάτωσης, οι οποίες μειώνουν με την πάροδο του χρόνου τη ρευστότητα και την πλαστικότητα του μίγματος, εφόσον καταναλώνουν το διαθέσιμο νερό (Τριανταφύλλου, 2013). Έτσι, το μίγμα αυτό καθίσταται ασταθές, όσον αφορά τις ρεολογικές του ιδιότητες.

Ένα τελευταίο συμπέρασμα που πηγάζει από τα αποτελέσματα της πρώτης παραγράφου της συγκεκριμένης Ενότητας, αφορά το 60% των συνθέσεων που σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου, στο πρώτο σύνολο των εισερχομένων δεδομένων του, προβλέφθηκαν με αποτυχία. Οι συγκεκριμένες συνθέσεις μιγμάτων αποτελούν τα δεδομένα εκείνα που σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC δεν θεωρούνται ως ΑΣΚ, αλλά σύμφωνα με τις ρεολογικές τους ιδιότητες μπορούν να χαρακτηριστούν ως ΑΣΚ. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι τα συγκεκριμένα μίγματα τα οποία έχουν ευμετάβλητες ρεολογικές ιδιότητες, δεν επιτρέπουν στον αλγόριθμο να τα αξιολογήσει σωστά. Μπορεί όμως και να σημαίνει και ότι η υπόθεση σύμφωνα με την οποία αξιολογήθηκαν ως ΑΣΚ δεν είναι απολύτως ορθή. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή περισσότερων πειραματικών διαδικασιών παρασκευής ΑΣΚ, ακόμη και συνθέσεων που αποκλίνουν από τις οδηγίες της EFNARC,

προκειμένου αφενός να μελετηθεί επακριβώς η ρεολογική τους συμπεριφορά και αφετέρου να αποδώσουν δεδομένα εισόδου για την εκπαίδευση του μοντέλου.

Με την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης του αλγορίθμου, λαμβάνει χώρα μία δεύτερη αξιολόγησή του, όπως αναφέρεται στην Ενότητα 4, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά ως δεδομένα ελέγχου, το δεύτερο σετ δεδομένων ελέγχου που περιλαμβάνει συνθέσεις αξιολογημένες ως προς την αυτοσυμπυκνωσιμότητά τους από δοκιμές που δεν περιλαμβάνονται στην οδηγία EFNARC. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο βέλτιστο μοντέλο ΤΝΔ στη θέση των δεδομένων ελέγχου, και ο αλγόριθμος προέβλεψε το χαρακτηρισμό τους. Η ακρίβεια πρόβλεψης προέκυψε 0.81, μιας και 5 από τις 26 μετρήσεις προβλέφθηκαν με αποτυχία. Αξίζει, για λόγους σύγκρισης, να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τον Πίνακα 6, η ακρίβεια του πρώτου σετ δεδομένων ελέγχου κυμαίνεται από 0.71 έως 0.85. Το γεγονός αυτό ενισχύει την εγκυρότητα του Μοντέλου 6 λίγο περισσότερο, μιας και οι δύο ακρίβειες πρόβλεψης έχουν παραπλήσιες τιμές.

Αναφορικά με τις σχέσεις μεταξύ ιδιοτήτων των συνθέσεων κονιαμάτων και επιτυχίας πρόβλεψης της αυτοσυμπυκνωσιμότητας των συγκεκριμένων μοντέλων για τη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε ότι οι πέντε (5) συνθέσεις που προβλέφθηκαν λάθος, είναι συνθέσεις που κατά την πλειοψηφία τους (4 στις 5) δεν αποτελούν συνθέσεις ΑΣΚ, σύμφωνα με τη μέθοδο αξιολόγησης που ακολουθείται. Χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή ποσότητα τιμέντου και χαμηλή ποσότητα πληρωτικού υλικού, όταν συγκρίνονται με τις υπόλοιπες συνθέσεις της συγκεκριμένης συλλογής δεδομένων, οι οποίες προβλέφθηκαν επιτυχώς, γεγονός που παρατηρήθηκε και στη πρώτη συλλογή δεδομένων ελέγχου, σύμφωνα με τις προηγούμενες γραμμές. Άρα, τα αποτελέσματα για τη σχέση των δύο συγκεκριμένων υλικών και του αλγορίθμου ΤΝΣ, ενισχύονται περαιτέρω με το παρόν αποτέλεσμα.

4.5 Εγκυρότητα Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν παραπάνω δεν είναι απόλυτα, και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν περισσότερο ως ενδείξεις για τις σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των εννοιών που αναφέρθηκαν. Ο λόγος για τη συγκεκριμένη επισήμανση δεν είναι άλλος από το πλήθος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται ώστε να εξαχθούν τα συμπεράσματα αυτά. Σύμφωνα με τους Goodfellow et al, σε περιπτώσεις παραμετρικών μοντέλων (prametric model) όπως είναι τα ΤΝΔ, τα συγκεκριμένα μοντέλα ορίζουν μία κατανομή η οποία αντιπροσωπεύει κατά το βέλτιστο δυνατό την πραγματική κατανομή που ακολουθούν τα εισερχόμενα δεδομένα. Η απόκλιση των δύο αυτών κατανομών χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη πιθανότητα να ταυτίζονται οι κατανομές αυτές, και υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης εμπειρικού κόστους Binary Cross-Entropy, στην περίπτωση του προβλήματος ταξινόμησης. Όσο πιο κοντά στην κανονική κατανομή βρίσκεται η πραγματική κατανομή που περιγράφει τα εισερχόμενα δεδομένα, τόσο πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ακρίβεια θα λάβει χώρα η διαδικασία της εκμάθησης του αλγορίθμου, μιας και η μορφή και τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κατανομής είναι συγκεκριμένα.

Σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα της Θεωρίας των Πιθανοτήτων (Σιμόπουλος, 2020): *Αν γίνεται δειγματοληψία μεγέθους N της στοχαστικής μεταβλητής x η οποία προέρχεται από πιθανοσύνολο (μ, σ) , το οποίο είτε ακολουθεί την κανονική κατανομή είτε ακολουθεί οποιαδήποτε κατανομή, και $N > 30$, τότε η στοχαστική μεταβλητή μέση τιμή του δείγματος μεγέθους $N(\bar{x}, N)$ ακολουθεί με ικανοποιητική προσέγγιση κανονική κατανομή. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η στοχαστική μεταβλητή μέση τιμή δείγματος μεγέθους $N(\bar{x}, N)$ ακολουθεί με ικανοποιητική προσέγγιση μία διαφορετική κατανομή (π.χ. κατανομή Student).*

Από τον ορισμό αυτό, και δεδομένου ότι το πλήθος των *δεδομένων ελέγχου* της *πρώτης φάσης* είναι 34 *συνθέσεις*, και της *δεύτερης φάσης* είναι 26, συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα που αφορούν την πρώτη φάση οριακά μπορεί να είναι αξιόπιστα, ενώ τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης οριακά δεν είναι αξιόπιστα.

5 Συμπεράσματα

Ο βασικός στόχος της εργασίας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας κατασκευής ενός μοντέλου πρόβλεψης της αυτοσυμπυκνωσιμότητας κονιαμάτων. Στο πλαίσιο αυτό κατασκευάστηκε μοντέλο πρόβλεψης με χρήση ΤΝΔ, ικανό να προβλέψει με επιτυχία 85% την ικανότητα μίας πλήρως προσδιορισμένης σύνθεσης κονιάματος, να επιτύχει τις βασικές κατά EFNARC ιδιότητες αυτοσυμπύκνωσης. Επιμέρους συμπεράσματα εξάγονται σχετικά με τα τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του μοντέλου πρόβλεψης.

Αναφορικά με τις σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των υπερπαραμέτρων ενός ΤΝΔ, επιγραμματικά:

- Η αύξηση του αριθμού των νευρώνων, οδηγεί σε ελάττωση του πλήθους των εποχών και σε μείωση του χρόνου υπολογισμού του αλγορίθμου.
- Η ελάττωση του ρυθμού εκμάθησης, οδηγεί σε πιο ομαλό διάγραμμα Loss -Epochs και σε αύξηση του αριθμού των εποχών.
- Όταν σε ένα δίκτυο λαμβάνουν χώρα πολλές αλλαγές υπερπαραμέτρων οι οποίες επιφέρουν σε αυτό αντίθετα αποτελέσματα, επικρατεί το αποτέλεσμα της αλλαγής που έγινε σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Η σύγκριση των διαφόρων μοντέλων με βάση την ακρίβεια επικύρωσης και ελέγχου, υποδεικνύει ότι το μοντέλο 6 ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις απαιτήσεις των δύο αυτών δεικτών, αφού και οι δύο έχουν υψηλές σχετικά τιμές, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι έχει γίνει σωστή επιλογή υπερπαραμέτρων και δεν υπάρχει κίνδυνος υπερεκπαίδευσης. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτήθηκε είναι ο ελάχιστος.

Η χρήση δεδομένων εισόδου τα οποία δεν είναι συμβατά με τις οδηγίες της EFNARC, αλλά ορίζουν την επάρκεια ενός αυτοσυμπυκνούμενου μίγματος μέσω άλλων πειραματικών μεθόδων, επιβεβαίωσαν την εγκυρότητα του μοντέλου, καθώς η αποτελεσματικότητα του μοντέλου διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την προσαρμοστικότητα και την αποτελεσματικότητα του μοντέλου 6.

Ωστόσο, για συνθέσεις οι οποίες αποκλίνουν σημαντικά από τις προδιαγραφές της EFNARC (π.χ. απουσία πληρωτικού υλικού, απουσία επαρκούς ποσότητας νερού, κ.α.) η επιτυχία των προβλέψεων μειώνεται. Η παραπάνω παρατήρηση πιθανώς εξηγείται από την απουσία μεγάλου πλήθους τέτοιων συνθέσεων στη βάση δεδομένων εισόδου για την εκπαίδευση του μοντέλου.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η αξιοπιστία του μοντέλου αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω με τη συνεχή διεύρυνση και ανανέωση της βάσης δεδομένων εκπαίδευσης, με πειραματικά αποτελέσματα.

Η αξιοποίηση και ευρεία χρήση παρόμοιων μοντέλων υπόσχεται σημαντική εξοικονόμηση πειραματικού χρόνου και την επικύρωση - ενίσχυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία Α

- N. Σ. Αναγνωστόπουλος, “Μηχανικά Χαρακτηριστικά και Ανθεκτικότητα Αυτοσυμπυκνούμενων Σκυροδεμάτων (ΑΣΣ) παρασκευασμένα με Ελληνικά υλικά”, Ξάνθη, Ελλάδα: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 2009.
- N. Διαμαντώνης, Ιδιότητες πάστας τσιμέντου σε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, Αθήνα, 2008.
- T.-O. Μαάιτα, Νευτώνια και μη Νευτώνια ρευστά, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, 2018.
- K. E. Μακρής και Δ. N. Σμαργιανάκη, Η επίδραση του μετακαολίνη στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες και στην ανθεκτικότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, Αθήνα, 2012.
- E. Σ. Σιμόπουλος, Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών, Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2020.
- Γ. Στάμου, Τεχνητή Νοημοσύνη – Μηχανική Μάθηση, Αθήνα: ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής και Υπολογιστών.
- I. Π. Σφήκας, Διερεύνηση Ιδιοτήτων ΑυτοΣυμπυκνούμενου Σκυροδέματος, Αθήνα ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, 2014.
- X. A. Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013.
- Abu Yaman, M., Abd Elaty, M., & Taman, M. (2017). Predicting the ingredients of self compacting concrete using artificial neural network. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.007>
- Benabed, B., Abousnina, R., & Kadri, E. (2020). 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*, 27(September 2019), 100951. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100951>
- Benli, A., Karatas, M., & Anil, H. (2020). Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 239, 117895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117895>
- Boukhelkhal, A., Azzouz, L., Benabed, B., & Belaïdi, A. (2017). Strength and durability of low-impact environmental self-compacting concrete incorporating waste marble powder. *Build. Mater. Struct.*, 4, 31–41.
- Bouvet, A., Ghorbel, E., & Bennacer, R. (2010). The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study. *Cement and Concrete Research*, 40(10), 1517–1523. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.06.005>
- Bouziani, T., & Benmounah, A. (2013). Correlation Between V-funnel and Mini-slump Test Results with Viscosity. 17, 173–178. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1569-1>
- de Matos, P. R., Pilar, R., Bromerchenkel, L. H., Schankoski, R. A., Gleize, P. J. P., & de Brito, J. (2020). 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*, 252, 119871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119871>
- Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., & Uyulgan, B. (2006). The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting

- repair mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1719–1726. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>
- Guidelines, T. E., & Concrete, S. (2005). ERMCO The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. May.
- Guidelines. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. 44(February).
- Guru Jawahar, J., Sashidhar, C., Ramana Reddy, I. V., & Annie Peter, J. (2013). Optimization of superplasticiser and viscosity modifying agent in self compacting mortar. *Asian Journal of Civil Engineering*, 14(1), 71–86.
- He, J., Bu, X., Bai, W., Zheng, W., Gao, Q., & Wang, Y. (2020). Preparation and properties of self-compacting alkali-activated slag repair mortar. *Construction and Building Materials*, 252, 119034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119034>
- Kaffetzakis, M., & Papanicolaou, C. C. (2016). Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete (LWASCC) semi-automated mix design methodology. *Construction and Building Materials*, 123, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.012>
- Karatas, M., Benli, A., & Toprak, H. A. (2019). Effect of incorporation of raw vermiculite as partial sand replacement on the properties of self-compacting mortars at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 221, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.077>
- Lozano-Lunar, A., da Silva, P. R., de Brito, J., Álvarez, J. I., Fernández, J. M., & Jiménez, J. R. (2019a). Performance and durability properties of self-compacting mortars with electric arc furnace dust as filler. *Journal of Cleaner Production*, 219, 818–832. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.145>
- Lozano-Lunar, Angélica, Raposeiro da Silva, P., de Brito, J., Fernández, J. M., & Jiménez, J. R. (2019b). Safe use of electric arc furnace dust as secondary raw material in self-compacting mortars production. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1375–1388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.002>
- Nasr, D., Behforouz, B., Borujeni, P. R., Borujeni, S. A., & Zehtab, B. (2019). 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*, 229, 116888. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116888>
- Nepomuceno, M. C. S., Pereira-de-oliveira, L. A., & Lopes, S. M. R. (2014). Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, 64, 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.021>
- Nepomuceno, M., Oliveira, L., & Lopes, S. M. R. (2012). 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*, 26(1), 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.027>
- Nguyen, H. (2019). Enhancement of engineering properties of slag-cement based self-compacting mortar with dolomite powder. *Journal of Building Engineering*, 24(January), 100738. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100738>
- T. Okado, T. Miyagawa, Study on a method of obtaining rheological coefficients of high-flow concrete from slump flow test, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements of JSCE* (1999) 113–130 (in Japanese)
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Sel-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.1, April 2003. 1(1), 5–15.
- Onyari, E. K., & Ikotun, B. D. (2018). Prediction of compressive and flexural strengths of a

- modified zeolite additive mortar using artificial neural network. *Construction and Building Materials*, 187, 1232–124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.079>
- Özcan, F., & Emin Koç, M. (2018). Influence of ground pumice on compressive strength and air content of both non-air and air entrained concrete in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*, 187, 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.183>
- Rasekh, H., Joshaghani, A., Jahandari, S., Aslani, F., & Ghodrat, M. (2019). Rheology and workability of SCC. In *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817369-5.00002-7>
- N. Roussel, P. Coussot, Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: from slump to spreading flow, *Journal of Rheology* 49 (3) (2005) 705–718.
- Safhi, A. el M., Benzerzour, M., Rivard, P., Abriak, N. E., & Ennahal, I. (2019). Development of self-compacting mortars based on treated marine sediments. *Journal of Building Engineering*, 22 (October 2018), 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.12.024>
- Santamaría, A., Gonzalez, J.J., Losanez, M.M., Skaf, M., Ortega-Lopez, V. (2020). The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate. *Cement and Concrete Composites* 111. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103627>
- Teimortashlu, E., Dehestani, M., & Jalal, M. (2018). Application of Taguchi method for compressive strength optimization of tertiary blended self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 190, 1182–1191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.165>
- N. Tregger, L. Ferrara, S.P. Shah, Identifying viscosity of cement paste from mini slump-flow test, *ACI Materials Journal* 105 (6) (2008) 558–5
- Zheng, J., & Hryciw, R. D. (2015). Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry. *Geotechnique*, 65(6), 494–506. <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.192>

Βιβλιογραφία Β

- S. Platias, K. I. Vatalis, and G. Charalampides, “Suitability of Quartz Sands for Different Industrial Applications,” *Procedia Econ. Financ.*, vol. 14, no. 14, pp. 491–498, 2014, doi: 10.1016/s2212-5671(14)00738-2.
- Y.ouldkhaoua, B. Benabed, R. Abousnina, and E. H. Kadri, “Experimental study on the reuse of cathode ray tubes funnel glass as fine aggregate for developing an ecological self-compacting mortar incorporating metakaolin,” *J. Build. Eng.*, vol. 27, no. May 2019, p. 100951, 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.100951.
- X. Yan et al, “Using EDTA-2Na to inhibit sulfate attack in slag cement mortar under steam curing,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, p. 120324, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120324.
- H. Guo, Z. Wang, D. An, and J. Huo, “Collaborative design of cement-based composites incorporated with cooper slag in considerations of engineering properties and microwave-absorbing characters,” *J. Clean. Prod.*, vol. 283, no. xxxx, p. 124614, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124614.
- G. Sabih, R. A. Tarefder, and S. M. Jamil, “Optimization of Gradation and Fineness Modulus of Naturally Fine Sands for Improved Performance as Fine Aggregate in Concrete,” *Procedia Eng.*, vol. 145, pp. 66–73, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.016.
- A. O. Mawlod and N. M. Saeed, “Impact of Cement Replacement Partially by Mosaic powder on Compressive Strength of Concrete,” *Eurasian J. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 2, 2017, doi: 10.23918/eajse.v2i2p9.
- I. Galobardes, R. P. Salvador, S. H. P. Cavalaro, A. Figueiredo, and C. I. Goodier, “Adaptation of the standard EN 196-1 for mortar with accelerator,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 127, pp. 125–136, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.147.
- F. Boucif, K. Marouf-Khelifa, I. Batonneau-Gener, J. Schott, and A. Khelifa, “Preparation, characterisation of thermally treated Algerian dolomite powders and application to azo-dye adsorption,” *Powder Technol.*, vol. 201, no. 3, pp. 277–282, 2010, doi: 10.1016/j.powtec.2010.04.013.
- M. Karataş, A. Benli, and A. Ergin, “Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 150, pp. 467–479, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.220.
- F. Arslan, A. Benli, and M. Karatas, “Effect of high temperature on the performance of self-compacting mortars produced with calcined kaolin and metakaolin,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 119497, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119497.
- L. A. Vergara and H. A. Colorado, “Additive manufacturing of Portland cement pastes with additions of kaolin, superplastificant and calcium carbonate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 248, p. 118669, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118669.
- M. Aškračić, M. Vyšvařil, D. Zakić, A. Savić, and B. Stevanović, “Effects of natural zeolite addition on the properties of lime putty-based rendering mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121363.
- E. Wibowo, Sutisna, M. Rokhmat, R. Murniati, Khairurrijal, and M. Abdullah, “Utilization of Natural Zeolite as Sorbent Material for Seawater Desalination,” *Procedia Eng.*, vol. 170, pp. 8–13, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.002.
- H. Shoukry, M. F. Kotkata, S. A. Abo-El-Enein, M. S. Morsy, and S. S. Shebl, “Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement

- composites modified with nano metakaolin,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 276–283, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.209.
- R. Liu and C. Poon, “Effects of red mud on properties of self-compacting mortar,” *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 1170–1178, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.052.
- M. R. Gowda, M. C. Narasimhan, and Karisiddappa, “Development and Study of the Strength of Self-Compacting Mortar Mixes Using Local Materials,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 5, pp. 526–532, 2011, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000202.
- X. Guan, C. Zhang, Y. Li, and S. Zhao, “Effect of exposure conditions on self-healing behavior of engineered cementitious composite incorporating limestone powder,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 114, no. August, p. 103808, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103808.
- T. Cheboub, Y. Senhadji, H. Khelafi, and G. Escadeillas, “Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self-compacting lightweight mortar containing olive kernel shells as aggregate,” *J. Clean. Prod.*, vol. 249, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119406.
- E. Güneysi, M. Gesoglu, H. Ghanim, S. Ipek, and I. Taha, “Influence of the artificial lightweight aggregate on fresh properties and compressive strength of the self-compacting mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 116, pp. 151–158, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.140.
- C. S. Shon and Y. S. Kim, “Evaluation of West Texas natural zeolite as an alternative of ASTM Class F fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 389–396, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.041.
- R. K. Dhir, M. J. McCarthy, and B. J. Magee, “Impact of BS EN 450 PFA on concrete construction in the UK,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 12, no. 1, pp. 59–74, 1998, doi: 10.1016/S0950-0618(97)00029-9.
- S. Adu-Amankwah, J. M. Khatib, D. E. Searle, and L. Black, “Effect of synthesis parameters on the performance of alkali-activated non-conformant en 450 pulverised fuel ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 121, pp. 453–459, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.132.
- A. S. Kadhim, A. A. Atiyah, and S. A. Salih, “Properties of self-compacting mortar containing nano cement kiln dust,” *Mater. Today Proc.*, vol. 20, no. xxxx, pp. 499–504, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.177.
- H. Madani, A. Bagheri, T. Parhizkar, A. Raisghasemi, and A. Ramezaniipoor, “The aggregation status of nanosilicas and silica fume, used in cementitious mixtures,” *Sustain. Constr. Mater. Technol.*, vol. 2013-Augus, 2013.
- J. F. Burroughs, J. Weiss, and J. E. Haddock, “Influence of high volumes of silica fume on the rheological behavior of oil well cement pastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 203, pp. 401–407, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.027.
- A. Anil Thakare et al, “A study on rheological properties of rubber fiber dosed self-compacting mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120745, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120745.
- A. Benli, M. Karataş, and Y. Bakir, “An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 144, pp. 552–562, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.228.
- B. W. Jo, C. H. Kim, G. ho Tae, and J. Bin Park, “Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 6, pp. 1351–1355, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.12.020.
- S. H. Chu and A. K. H. Kwan, “Co-addition of metakaolin and silica fume in mortar: effects

- and advantages,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 197, pp. 716–724, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.244.
- A. Benli, K. Turk, and C. Kina, “Influence of Silica Fume and Class F Fly Ash on Mechanical and Rheological Properties and Freeze-Thaw Durability of Self-Compacting Mortars,” *J. Cold Reg. Eng.*, vol. 32, no. 3, p. 04018009, 2018, doi: 10.1061/(asce)cr.1943-5495.0000167.
- R. Kohani Khoshkbijari, M. Fard Samimi, F. Mohammadi, and P. Talebitaher, “Effects of Mica and Feldspar as partial cement replacement on the rheological, mechanical and thermal durability of self-compacting mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120149, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120149.
- O. Issn, “Influence of mica on unconfined compressive strength of a cement-treated weathered granite gravel,” *Journal of the South African Institution of Civil Engineering* pp. 1–9, 2020.
- N. Bayat, S. Baghshahi, and P. Alizadeh, “Synthesis of white pearlescent pigments using the surface response method of statistical analysis,” *Ceram. Int.*, vol. 34, no. 8, pp. 2029–2035, 2008, doi: 10.1016/j.ceramint.2007.07.034.
- S. Çetinkaya, M. Karakişla, A. Özer, and M. Saçak, “Conductive potassium feldspar/polyaniline composites prepared by in situ chemical polymerization,” *Synth. Met.*, vol. 157, no. 18–20, pp. 702–707, 2007, doi: 10.1016/j.synthmet.2007.07.014.
- R. MATHUR and A. SONI, “Study on the Particle Size Distribution (Nano-Particles) of Mining Minerals on Whiteness of Triaxial Body,” *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.*, vol. 22, pp. 239–247, 2013, doi: 10.1142/s2010194513010180.
- M. Karatas, A. Benli, and F. Arslan, “The effects of kaolin and calcined kaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting mortars subjected to high temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, p. 120300, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120300.
- M. M. Khotbehsara, B. M. Miyandehi, F. Naseri, T. Ozbakkaloglu, F. Jafari, and E. Mohseni, “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,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 823–834, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.067.
- A. Benli, M. Karataş, and E. Gurses, “Effect of sea water and MgSO₄ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 464–474, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.108.
- M. Sri Rama Chand, P. Swamy Naga Ratna Giri, P. Rathish Kumar, G. Rajesh Kumar, and C. Raveena, “Effect of self curing chemicals in self compacting mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 107, pp. 356–364, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.018.
- A. Georgiadis, “Optimization of mix design, production and use of self-compacting concrete mixtures in industrial scale in Greece”, Xanthi, Greece: Democritus University of Thrace, 2010.

Παράρτημα Α. Πειραματικά δεδομένα

Υπόμνημα:

! = μίγματα τα οποία απορρίφθηκαν οπτικά

#	water			cement			filler						fine aggregates						test results		output data			
	quantity	specific surface	quantity	quantity	D90	D70	D50	D30	D10	specific surface	specific gravity	sphericity Sa	quantity	D90	D70	D50	D30	D10	Dmax	fineness modulus		specific gravity	mini Slump flow	mini V funnel
	kg/m3	cm2/g	kg/m3	kg/m3	μm	μm	μm	μm	μm	cm2/g	g/cm3	-	kg/m3	μm	μm	μm	μm	μm	μm	g/cm3	g/cm3	cm	sec	
151	246.35	3470	547.35	184.73	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	2500	2.70	0.58	1375.97	3110.00	1660.00	932.00	394.00	60.00	4000	3.20	2.69	28.0	16.50	0
152	246.35	3470	547.35	184.73	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1375.97	3110.00	1660.00	932.00	394.00	60.00	4000	3.20	2.69	26.3	10.30	0
153	239.75	3470	532.77	359.62	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1231.62	3110.00	1660.00	932.00	394.00	60.00	4000	3.20	2.69	25.5	18.00	0
154	268.40	3470	603.91	181.17	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	27.5	7.20	1
156	275.81	3470	620.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1418.13	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	24.3	6.91	0
157	274.17	3470	616.90	233.03	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1299.12	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	26.0	11.02	0
158	268.40	3470	603.91	148.22	100.97	60.00	35.73	17.50	5.41	1890	2.20	0.51	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	24.5	10.49	1
159	268.40	3470	603.91	181.17	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	24.8	7.45	1
160	268.40	3470	603.91	168.35	157.13	105.00	77.13	54.00	19.20	730	2.50	0.48	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	23.8	10.12	1
161	268.40	3470	603.91	154.33	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	25.5	11.89	0
162	268.40	3470	603.91	76.50	93.64	58.00	35.56	17.50	5.41	2335	1.80	0.71	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	24.0	8.89	1
164	245.00	3470	535.50	343.09	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1231.83	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	27.5	11.00	0
165	225.00	3470	551.25	364.50	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1250.85	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	27.0	12.50	0
166	210.00	3470	557.55	378.59	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1271.78	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	28.0	14.00	0
167	200.00	3470	567.00	397.49	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1271.78	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	28.0	15.50	0

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου
ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»

168	245.00	535.50	3470	343.09	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1231.83	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	29.0	14.00	0
169	225.00	551.25	3470	364.50	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1250.85	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	28.0	15.00	0
170	210.00	557.55	3470	378.59	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1271.78	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	27.5	15.50	0
171	200.00	567.00	3470	397.49	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1271.78	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	29.0	16.00	0
172	245.00	535.50	3470	292.26	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1231.83	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
173	225.00	551.25	3470	310.50	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1250.85	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
174	210.00	557.55	3470	322.51	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1271.78	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
176	271.67	535.50	3470	292.26	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1231.83	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	28.0	11.00	0
178	226.67	543.29	3470	327.77	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1239.64	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	29.0	20.00	0
179	216.11	553.08	3470	344.48	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1240.95	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	28.5	24.00	0
180	241.78	533.13	3470	366.22	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1201.35	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
181	226.71	545.92	3470	374.15	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1222.73	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
182	216.64	558.63	3470	376.61	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1236.31	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
184	256.89	522.87	3470	357.77	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1178.21	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	27.0	9.00	1
186	230.66	549.03	3470	368.70	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1215.00	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	29.0	17.00	0
187	220.10	558.75	3470	361.91	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1241.54	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	28.0	20.00	0
189	233.55	562.39	3470	511.98	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1278.64	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
190	223.23	575.62	3470	515.40	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1293.14	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
192	288.19	568.06	3470	458.31	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1306.74	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
193	251.82	556.97	3470	483.69	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1264.27	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
194	235.73	565.01	3470	503.90	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1289.19	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
195	225.15	576.22	3470	530.54	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1292.87	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
196	277.07	523.65	3470	477.74	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1197.82	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	27.5	16.00	0
197	260.56	537.79	3470	489.58	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1222.70	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	28.0	19.00	0
198	241.77	434.20	3470	478.45	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1200.46	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	28.0	21.00	0
200	80.00	603.91	3470	689.87	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0

Ανάπτυξη Μοντέλου Πρόβλεψης Ρεολογικών Χαρακτηριστικών
Αυτοσυμπκνούμενου Κονιάματος με τη Μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

201	80.00	1197.39	3470	181.17	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
203	75.00	603.91	3470	703.37	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
204	75.00	1213.14	3470	181.17	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
205	75.00	603.91	3470	181.17	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1792.03	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
206	86.10	611.86	3470	649.70	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1269.34	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
207	85.30	1185.80	3470	172.38	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1257.32	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
208	85.30	606.00	3470	172.40	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1744.95	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
209	74.48	642.58	3470	960.52	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1353.20	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
210	71.51	1255.33	3470	233.05	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1299.13	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
211	71.72	618.71	3470	233.74	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1849.73	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
212	420.00	126.39	3470	181.17	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
213	420.00	603.91	3470	181.17	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	863.98	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
214	410.00	157.89	3470	181.17	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
215	410.00	603.91	3470	181.17	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	890.88	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
216	431.50	95.21	3470	172.38	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1257.23	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
217	431.50	606.02	3470	172.38	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	827.51	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
218	434.14	113.02	3470	233.05	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1299.13	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
219	433.14	615.48	3470	232.51	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	866.82	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
220	310.00	472.89	3470	181.17	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	25.0	4.00	0
222	300.00	504.39	3470	181.17	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	23.0	4.50	0
223	300.00	603.91	3470	181.17	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1186.78	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	22.0	5.50	0
224	316.10	458.74	3470	172.38	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1257.23	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	23.0	5.50	0
225	316.10	606.02	3470	172.38	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1133.32	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	21.5	6.00	0
226	326.89	450.89	3470	233.05	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1299.13	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	22.0	6.00	0
227	326.64	616.43	3470	232.87	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1156.47	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	21.5	6.00	0

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου
ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»

155	268.40	603.91	3470	181.17	57.00	34.00	21.00	12.00	3.00	2800	2.70	0.46	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	26.0	9.14	1
163	268.40	603.91	3470	122.20	93.64	58.00	35.56	17.50	5.41	2335	1.80	0.71	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	26.5	8.93	1
175	200.00	567.00	3470	338.61	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1271.78	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
177	242.49	536.33	3470	315.07	30.00	15.00	8.80	5.50	2.80	30000	2.30	0.37	1217.41	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	29.0	17.00	0
183	206.53	568.10	3470	369.38	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1262.24	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
185	241.23	536.20	3470	366.11	15.00	7.50	3.80	2.10	1.10	25000	2.70	0.58	1200.00	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	27.0	13.00	0
188	248.93	548.90	3470	500.77	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1255.56	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
191	212.75	585.18	3470	505.36	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1319.88	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
199	238.10	561.31	3470	484.76	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1266.07	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	29.5	25.00	0
202	80.00	603.91	3470	181.17	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1778.58	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	!	!	0
221	310.00	603.91	3470	181.17	13.00	7.50	4.90	2.90	1.50	12700	2.70	0.56	1159.88	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	22.0	5.50	0
228	268.40	603.91	3470	187.89	112.00	75.00	50.00	32.00	13.00	5000	2.80	0.69	1271.77	3507.00	2224.00	1221.00	437.00	31.00	4000	2.73	2.67	26.3	9.62	1

Παράρτημα Β. Βιβλιογραφικά δεδομένα

Ο ακόλουθος πίνακας συμπληρώθηκε σύμφωνα με τα δεδομένα που περιέχονται στις βιβλιογραφικές αναφορές των Αναγνωστόπουλος, Nasr et al, Teimortashlu et al, Benli et al, Ozcan et al, de Matos et al, Nguyen et al, που αναγράφονται στην Ενότητα Βιβλιογραφία Α, καθώς και σύμφωνα με όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές που αναγράφονται στην Ενότητα Βιβλιογραφία Β.

Υπόμνημα:

	= δεδομένο από κανονισμοί
	= δεδομένο από άλλη βιβλιογραφική πηγή
	= δεδομένο ως μέση τιμή αντίστοιχών του
	= δεδομένο από πειραματικά δεδομένα

#	water			cement			filler						fine aggregates									test results		output data
	quantity	specific surface	quantity	quantity	D90	D70	D50	D30	D10	specific surface	specific gravity	sphericity Sa	quantity	D90	D70	D50	D30	D10	Dmax	fineness modulus	specific gravity	mini Slump flow	mini V funnel	
	kg/m3	cm2/g	kg/m3	kg/m3	μm	μm	μm	μm	μm	cm2/g	g/cm3	-	kg/m3	μm	μm	μm	μm	μm	μm	g/cm3	g/cm3	cm	sec	
1	293.00	5050	757.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1234.00	350.00	270.00	230.00	210.00	160.00	2360	1.72	2.65	25.5	4.90	0
3	293.00	5050	606.00	117.00	150.00	80.00	37.50	9.00	1.80	4310	2.80	0.67	1234.00	350.00	270.00	230.00	210.00	160.00	2360	1.72	2.65	26.4	7.80	1
4	293.00	5050	530.00	175.00	150.00	80.00	37.50	9.00	1.80	4310	2.80	0.67	1234.00	350.00	270.00	230.00	210.00	160.00	2360	1.72	2.65	25.1	10.30	1
5	293.00	5050	681.00	66.00	150.00	82.00	38.10	10.10	4.50	2510	2.38	0.60	1234.00	350.00	270.00	230.00	210.00	160.00	2360	1.72	2.65	24.0	5.70	0
7	293.00	5050	530.00	198.00	150.00	82.00	38.10	10.10	4.50	2510	2.38	0.60	1234.00	350.00	270.00	230.00	210.00	160.00	2360	1.72	2.65	26.8	5.10	1
8	270.18	3300	675.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1325.00	2800.00	850.00	550.00	400.00	210.00	5000	2.44	2.70	32.0	3.50	1
9	270.18	3300	641.67	33.77	17.00	7.00	3.60	1.80	0.60	7000	2.45	0.59	1325.00	2800.00	850.00	550.00	400.00	210.00	5000	2.44	2.70	30.5	4.75	0
10	270.18	3300	607.90	67.54	17.00	7.00	3.60	1.80	0.60	7000	2.45	0.59	1325.00	2800.00	850.00	550.00	400.00	210.00	5000	2.44	2.70	30.0	7.75	0
11	270.18	3300	574.12	101.32	17.00	7.00	3.60	1.80	0.60	7000	2.45	0.59	1325.00	2800.00	850.00	550.00	400.00	210.00	5000	2.44	2.70	30.0	8.50	0
12	294.90	3923	460.70	460.70	30.00	16.00	9.00	4.80	1.00	4000	2.90	0.59	1060.00	3800.00	2000.00	1450.00	700.00	240.00	4000	2.72	2.65	25.0	6.00	1
13	294.90	3923	460.70	460.70	60.00	39.00	28.00	16.00	3.90	1820	2.90	0.50	1060.00	3800.00	2000.00	1450.00	700.00	240.00	4000	2.72	2.65	25.0	6.00	1
14	247.00	3430	650.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1388.00	2700.00	1500.00	875.00	625.00	260.00	4000	3.27	2.63	24.5	8.47	1

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου
ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»

15	247.00	617.50	3430	32.50	13.00	6.60	3.90	2.20	1.00	2871	2.47	0.55	1378.24	2700.00	1500.00	875.00	625.00	260.00	4000	3.27	2.63	24.1	8.33	1
16	247.00	585.00	3430	65.00	13.00	6.60	3.90	2.20	1.00	2871	2.47	0.55	1371.00	2700.00	1500.00	875.00	625.00	260.00	4000	3.27	2.63	24.1	8.13	1
17	260.00	552.50	3430	97.50	13.00	6.60	3.90	2.20	1.00	2871	2.47	0.55	1329.00	2700.00	1500.00	875.00	625.00	260.00	4000	3.27	2.63	24.5	8.40	1
18	273.00	520.00	3430	130.00	13.00	6.60	3.90	2.20	1.00	2871	2.47	0.55	1289.00	2700.00	1500.00	875.00	625.00	260.00	4000	3.27	2.63	24.7	8.62	1
19	273.00	487.50	3430	162.50	13.00	6.60	3.90	2.20	1.00	2871	2.47	0.55	1282.00	2700.00	1500.00	875.00	625.00	260.00	4000	3.27	2.63	24.5	8.47	1
20	273.00	455.00	3430	195.00	13.00	6.60	3.90	2.20	1.00	2871	2.47	0.55	1275.00	2700.00	1500.00	875.00	625.00	260.00	4000	3.27	2.63	24.3	8.33	1
21	273.00	422.50	3430	227.50	13.00	6.60	3.90	2.20	1.00	2871	2.47	0.55	1268.00	2700.00	1500.00	875.00	625.00	260.00	4000	3.27	2.63	24.1	8.19	1
22	270.90	630.00	3070	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1336.90	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	24.3	10.00	1
25	270.90	535.50	3070	94.50	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	7430	2.53	0.52	1321.50	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	26.0	8.00	1
26	270.90	504.00	3070	126.00	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	7430	2.53	0.52	1316.30	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	26.0	8.00	1
27	270.90	598.50	3070	31.50	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	13990	2.60	0.59	1331.10	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	24.5	10.00	1
28	270.90	567.00	3070	63.00	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	13990	2.60	0.59	1325.40	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	26.0	8.00	1
31	275.00	550.00	3200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1275.00	2712.72	1374.48	848.53	526.33	247.67	4174	2.77	2.60	24.6	10.20	1
32	275.00	522.50	3200	27.50	98.00	14.00	7.50	2.50	0.70	3100	2.20	0.62	1275.00	2712.72	1374.48	848.53	526.33	247.67	4174	2.77	2.60	24.5	10.50	1
33	275.00	495.00	3200	55.00	98.00	14.00	7.50	2.50	0.70	3100	2.20	0.62	1275.00	2712.72	1374.48	848.53	526.33	247.67	4174	2.77	2.60	24.3	10.80	1
34	275.00	467.50	3200	82.50	98.00	14.00	7.50	2.50	0.70	3100	2.20	0.62	1275.00	2712.72	1374.48	848.53	526.33	247.67	4174	2.77	2.60	24.2	10.90	1
35	275.00	440.00	3200	110.00	98.00	14.00	7.50	2.50	0.70	3100	2.20	0.62	1275.00	2712.72	1374.48	848.53	526.33	247.67	4174	2.77	2.60	24.0	11.00	1
36	283.50	630.00	3430	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1308.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	25.5	8.10	1
37	283.50	598.50	3430	31.50	187.50	109.50	92.00	70.00	30.00	4500	2.40	0.68	1294.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	24.7	7.70	1
38	289.80	567.00	3430	63.00	187.50	109.50	92.00	70.00	30.00	4500	2.40	0.68	1262.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	24.5	7.50	1
43	340.20	535.50	3430	94.50	230.00	115.00	94.00	73.00	31.50	4500	0.70	0.57	880.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	24.5	7.80	1
44	352.80	504.00	3430	126.00	230.00	115.00	94.00	73.00	31.50	4500	0.70	0.57	755.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	24.1	7.50	1
45	244.00	330.00	3520	286.00	45.00	28.00	18.00	12.00	7.00	3525.5	2.31	0.86	1378.00	1715.00	691.00	446.00	281.00	184.00	5000	2.20	2.62	25.3	4.01	0
46	354.82	443.53	2280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1330.58	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.44	2.65	20.0	38.00	0
47	383.34	479.17	2280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1224.55	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.44	2.65	26.0	20.00	0
48	409.67	512.09	2280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1126.61	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.44	2.65	24.0	19.00	0

Ανάπτυξη Μοντέλου Πρόβλεψης Ρεολογικών Χαρακτηριστικών
Αυτοσυμπκνούμενου Κονιάματος με τη Μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

49	456.75	570.94	2280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	951.56	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.44	2.65	23.0	23.00	0	
50	434.08	542.60	2280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1035.86	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.44	2.65	28.0	15.00	0	
51	438.74	548.43	2280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1018.51	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.44	2.65	30.0	22.00	0	
52	429.34	536.68	2280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1053.48	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.44	2.65	26.5	15.00	0	
53	413.61	551.47	2280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1082.52	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.44	2.65	25.0	8.00	1	
54	210.00	480.00	3050	120.00	42.00	27.00	16.00	7.00	3.40	4800	2.70	0.60	1524.64	3300.00	1800.00	1000.00	620.00	240.00	4250	3.00	2.66	25.7	8.90	1
55	273.00	650.00	4187	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1300.00	3029.25	2279.25	1718.00	1297.50	867.00	4000	3.76	1.60	26.5	7.44	1	
56	178.20	405.00	3260	135.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1483.90	5015.00	2890.00	1647.00	679.00	293.00	6500	2.87	2.40	27.0	26.00	0
58	178.20	405.00	3260	135.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1374.70	4369.95	2534.89	1578.65	800.54	344.08	6500	2.84	2.19	24.3	28.30	0
59	178.20	405.00	3260	135.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1320.10	4007.33	2335.26	1540.23	868.87	372.80	6500	2.83	2.07	24.0	29.00	0
60	192.40	390.00	3260	130.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1469.00	5015.00	2890.00	1647.00	679.00	293.00	6500	2.87	2.40	28.0	20.00	0
61	192.40	390.00	3260	130.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1414.90	4704.81	2719.23	1614.13	737.45	317.56	6500	2.85	2.30	27.3	21.50	0
63	192.40	390.00	3260	130.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1306.70	4007.37	2335.28	1540.24	868.86	372.80	6500	2.83	2.07	24.5	26.00	0
64	200.00	375.00	3260	125.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1476.90	5015.00	2890.00	1647.00	679.00	293.00	6500	2.87	2.40	28.6	13.00	0
66	200.00	375.00	3260	125.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1368.10	4369.91	2534.87	1578.65	800.55	344.09	6500	2.84	2.19	25.8	19.00	0
67	200.00	375.00	3260	125.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1313.80	4007.38	2335.29	1540.24	868.86	372.80	6500	2.83	2.07	25.2	23.00	0
68	211.20	360.00	3260	120.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1469.80	5015.00	2890.00	1647.00	679.00	293.00	6500	2.87	2.40	28.8	11.70	0
69	211.20	360.00	3260	120.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1415.70	4704.85	2719.26	1614.14	737.44	317.56	6500	2.85	2.30	28.5	16.50	0
71	211.20	360.00	3260	120.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1307.40	4007.35	2335.27	1540.24	868.86	372.80	6500	2.83	2.07	25.7	21.00	0
72	210.00	450.00	3950	150.00	15.00	8.00	6.00	4.30	2.50	150000	2.30	0.72	1200.00	2550.00	1290.00	840.00	500.00	230.00	4750	2.61	2.65	25.9	13.00	0
73	278.37	795.33	3700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1193.00	2505.00	1600.00	900.00	500.00	160.00	4750	2.93	2.92	24.2	3.56	0	
74	276.09	788.83	3700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1112.25	2534.57	1621.28	934.04	534.04	178.72	4750	2.98	2.84	24.9	3.81	0	
75	268.92	768.33	3700	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1044.93	2545.88	1629.41	947.06	547.06	185.88	4750	3.00	2.81	27.1	6.03	1	
76	270.10	771.72	3700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1010.95	2563.36	1641.98	967.18	567.18	196.95	4750	3.03	2.77	18.1	10.69	0	
77	262.03	748.65	3700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	950.79	2581.61	1655.12	988.19	588.19	208.50	4750	3.06	2.72	18.0	10.72	0	
78	245.70	630.00	3490	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1306.24	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.1	10.00	1	

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου
ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»

79	258.30	567.00	3490	63.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	1343	2.50	0.86	1271.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.7	10.00	1
80	270.90	504.00	3490	126.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	1343	2.50	0.86	1238.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.7	10.00	1
81	302.40	441.00	3490	189.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	1343	2.50	0.86	1154.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.1	11.11	0
82	233.54	592.20	3490	39.00	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	2.20	0.86	1324.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.3	11.11	0
83	250.20	567.00	3490	58.50	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	2.20	0.86	1282.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.1	11.11	0
84	260.32	541.80	3490	78.00	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	2.20	0.86	1240.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.1	11.11	0
85	288.00	640.00	3484	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1227.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	24.7	7.10	1
86	275.20	480.00	3484	160.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3812	2.08	0.86	1194.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	24.1	11.00	1
89	275.20	384.00	3484	256.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3812	2.08	0.86	1155.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	25.0	14.80	0
90	281.60	608.00	3484	32.00	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	1.84	0.86	1230.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	24.2	7.00	1
91	288.00	576.00	3484	64.00	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	1.84	0.86	1203.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	24.4	5.50	0
92	300.80	544.00	3484	96.00	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	1.84	0.86	1159.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	24.1	4.00	0
93	320.00	512.00	3484	128.00	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	1.84	0.86	1106.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	24.4	3.50	0
94	280.00	700.00	3200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1319.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	25.7	7.81	1
95	280.00	630.00	3200	70.00	1.80	0.80	0.60	0.42	0.30	139.2	2.91	0.36	1319.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	25.2	8.70	1
97	280.00	490.00	3200	210.00	1.80	0.80	0.60	0.42	0.30	139.2	2.91	0.36	1319.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.4	9.52	1
98	280.00	630.00	3200	70.00	0.19	0.14	0.12	0.08	0.03	196.4	2.58	0.47	1319.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.9	8.93	1
99	280.00	560.00	3200	140.00	0.19	0.14	0.12	0.08	0.03	196.4	2.58	0.47	1319.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.4	9.43	1
100	280.00	490.00	3200	210.00	0.19	0.14	0.12	0.08	0.03	196.4	2.58	0.47	1319.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.2	9.71	1
101	210.00	700.00	3200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1482.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	25.4	9.17	1
102	210.00	700.00	3200	70.00	1.80	0.80	0.60	0.42	0.30	139.2	2.91	0.36	1482.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	25.0	9.71	1
104	210.00	700.00	3200	210.00	1.80	0.80	0.60	0.42	0.30	139.2	2.91	0.36	1482.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.2	10.20	1
105	210.00	630.00	3200	70.00	0.19	0.14	0.12	0.08	0.03	196.4	2.58	0.47	1482.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.7	9.80	1
107	210.00	490.00	3200	210.00	0.19	0.14	0.12	0.08	0.03	196.4	2.58	0.47	1482.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.1	10.42	1
108	270.90	630.00	3070	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1336.90	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	24.3	8.10	1
109	270.90	589.50	3070	31.50	2.30	1.90	1.40	1.20	0.90	5530	2.60	0.30	1331.80	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	24.5	7.70	1

Ανάπτυξη Μοντέλου Πρόβλεψης Ρεολογικών Χαρακτηριστικών
Αυτοσυμπυκνούμενου Κονιάματος με τη Μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

111	270.90	535.50	3070	94.50	2.30	1.90	1.40	1.20	0.90	5530	2.60	0.30	1321.50	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	25.3	8.30	1
112	270.90	504.00	3070	126.00	2.30	1.90	1.40	1.20	0.90	5530	2.60	0.30	1316.30	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	26.0	7.70	1
113	270.90	598.50	3070	31.50	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	6890	2.55	0.52	1331.10	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	24.5	8.30	1
115	270.90	535.50	3070	94.50	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	6890	2.55	0.52	1319.60	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	25.0	7.80	1
116	270.90	504.00	3070	126.00	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	6890	2.55	0.52	1313.80	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	25.5	7.50	1
117	280.00	525.00	3250	175.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	5230	2.20	0.86	1210.00	2550.00	1290.00	840.00	500.00	230.00	4750	2.90	2.60	25.0	8.25	1
118	279.50	650.00	3490	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1211.80	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.0	10.20	1
119	260.00	585.00	3490	65.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	2900	2.20	0.86	1240.60	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.8	10.42	1
120	260.00	520.00	3490	130.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	2900	2.20	0.86	1235.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.6	10.53	1
121	266.50	455.00	3490	195.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	2900	2.20	0.86	1212.50	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	24.9	10.75	1
122	305.50	611.00	3490	39.00	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	2.20	0.86	1130.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.0	10.87	1
123	318.50	591.50	3490	58.50	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	2.20	0.86	1089.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	24.8	10.99	1
124	331.50	572.00	3490	78.00	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	2.20	0.86	1065.00	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.2	10.87	1
125	338.00	552.50	3490	97.50	80.00	35.00	13.00	3.00	0.70	150000	2.20	0.86	1041.20	2900.00	1550.00	890.00	625.00	300.00	4000	3.29	2.63	25.2	11.11	0
126	319.60	940.00	2250	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	940.00	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.74	2.65	24.3	10.23	1
127	291.00	485.00	2250	97.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3525.5	2.17	0.86	1455.00	3157.00	1123.00	668.00	418.00	204.00	4750	2.74	2.65	24.5	9.36	1
128	185.20	353.60	3667.4	144.00	36.00	20.00	13.00	7.50	1.40	2800	2.70	0.60	862.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	26.3	6.94	1
129	191.44	369.12	3667.4	150.00	36.00	20.00	13.00	7.50	1.40	2800	2.70	0.60	826.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	28.0	4.16	1
130	195.04	368.68	3667.4	150.00	36.00	20.00	13.00	7.50	1.40	2800	2.70	0.60	817.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	25.5	3.90	0
131	189.32	433.00	3667.4	119.00	36.00	20.00	13.00	7.50	1.40	2800	2.70	0.60	808.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	25.9	8.97	1
132	197.92	453.00	3667.4	125.00	36.00	20.00	13.00	7.50	1.40	2800	2.70	0.60	763.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	26.0	7.00	1
133	192.88	356.00	3667.4	101.80	36.00	20.00	13.00	7.50	1.40	2800	2.70	0.60	888.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	25.3	6.47	1
134	188.84	354.50	3667.4	50.70	36.00	20.00	13.00	7.50	1.40	2800	2.70	0.60	944.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	23.7	8.18	1
135	187.50	435.40	3667.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	944.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	25.5	10.75	1
136	187.60	434.90	3667.4	50.00	36.00	20.00	13.00	7.50	1.40	2800	2.70	0.60	880.00	3600.00	2100.00	1050.00	500.00	130.00	4000	3.10	2.65	25.8	6.87	1
137	275.82	495.76	4300	302.71	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1188.00	3000.00	1500.00	800.00	600.00	300.00	4000	3.28	2.60	25.5	7.10	1

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου
ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»

138	252.53	519.71	4300	211.59	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1320.00	3000.00	1500.00	800.00	600.00	300.00	4000	3.28	2.60	25.6	10.10	1
139	278.53	636.29	4300	175.47	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1188.24	3000.00	1500.00	800.00	600.00	300.00	4000	3.28	2.60	25.0	7.13	1
140	274.71	443.53	4300	270.82	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1267.18	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	25.0	7.88	1
141	255.00	493.53	4300	200.88	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1345.88	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	25.5	10.00	1
142	265.59	549.41	4300	151.53	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1320.00	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	25.0	9.75	1
143	284.12	445.06	4300	271.76	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1240.59	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	24.5	7.00	1
144	264.12	494.94	4300	201.47	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1320.00	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	25.5	7.00	1
145	266.47	547.29	4300	150.94	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1320.00	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	24.6	7.00	1
146	278.24	662.94	4300	153.18	63.00	24.00	11.00	4.00	1.00	2739	2.65	0.60	1188.24	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	26.0	11.00	1
147	279.41	494.94	4300	191.18	80.00	48.00	24.50	13.00	4.00	1960	2.51	0.55	1320.00	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	25.2	8.69	1
148	283.53	547.29	4300	144.71	80.00	48.00	24.50	13.00	4.00	1960	2.51	0.55	1320.00	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	26.0	9.00	1
149	276.47	494.94	4300	198.82	80.00	48.00	24.50	13.00	4.00	1960	2.51	0.55	1320.00	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	25.3	11.00	1
150	277.94	547.29	4300	147.06	80.00	48.00	24.50	13.00	4.00	1960	2.51	0.55	1320.00	3800.00	2200.00	1300.00	550.00	150.00	4000	3.28	2.60	25.4	11.30	0
2	293.00	681.00	5050	58.00	150.00	80.00	37.50	9.00	1.80	4310	2.80	0.67	1234.00	350.00	270.00	230.00	210.00	160.00	2360	1.72	2.65	24.6	9.60	1
6	293.00	606.00	5050	132.00	150.00	82.00	38.10	10.10	4.50	2510	2.38	0.60	1234.00	350.00	270.00	230.00	210.00	160.00	2360	1.72	2.65	24.6	6.00	0
23	270.90	598.50	3070	31.50	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	7430	2.53	0.52	1331.80	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	25.5	7.70	1
24	270.90	567.00	3070	63.00	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	7430	2.53	0.52	1326.60	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	24.5	9.00	1
29	270.90	535.50	3070	94.50	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	13990	2.60	0.59	1319.60	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	25.0	9.00	1
30	270.90	504.00	3070	126.00	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	13990	2.60	0.59	1313.80	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	24.0	10.00	1
39	302.40	535.50	3430	94.50	187.50	109.50	92.00	70.00	30.00	4500	2.40	0.68	1215.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	26.0	8.40	1
40	302.40	504.00	3430	126.00	187.50	109.50	92.00	70.00	30.00	4500	2.40	0.57	1200.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	24.5	7.70	1
41	315.00	598.50	3430	31.50	230.00	115.00	94.00	73.00	31.50	4500	0.70	0.57	1129.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	26.0	8.40	1
42	327.60	567.00	3430	63.00	230.00	115.00	94.00	73.00	31.50	4500	0.70	0.57	1004.00	2800.00	1500.00	880.00	625.00	280.00	3500	2.87	2.63	25.8	8.20	1
57	178.20	405.00	3260	135.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1429.40	4704.75	2719.20	1614.13	737.46	317.57	6500	2.85	2.30	25.0	27.20	0
62	192.40	390.00	3260	130.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1360.80	4369.95	2534.89	1578.66	800.54	344.08	6500	2.84	2.19	25.1	22.00	0

Ανάπτυξη Μοντέλου Πρόβλεψης Ρεολογικών Χαρακτηριστικών
Αυτοσυμπυκνούμενου Κονιάματος με τη Μέθοδο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

65	200.00	375.00	3260	125.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1422.50	4704.79	2719.22	1614.13	737.45	317.57	6500	2.85	2.30	27.5	18.10	0
70	211.20	360.00	3260	120.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3790	2.00	0.86	1361.60	4369.93	2534.88	1578.65	800.55	344.08	6500	2.84	2.19	26.2	18.60	0
87	275.20	448.00	3484	192.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3812	2.08	0.86	1181.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	24.2	12.00	1
88	275.20	416.00	3484	224.00	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3812	2.08	0.86	1168.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.63	24.7	12.00	1
96	280.00	560.00	3200	140.00	1.80	0.80	0.60	0.42	0.30	139.2	2.91	0.36	1319.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.6	9.35	1
103	210.00	700.00	3200	140.00	1.80	0.80	0.60	0.42	0.30	139.2	2.91	0.36	1482.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.5	9.90	1
106	210.00	560.00	3200	140.00	0.19	0.14	0.12	0.08	0.03	196.4	2.58	0.47	1482.00	2000.00	900.00	500.00	300.00	200.00	6000	2.45	2.61	24.2	10.00	1
110	270.90	567.00	3070	63.00	2.30	1.90	1.40	1.20	0.90	5530	2.60	0.30	1326.60	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	24.5	7.60	1
114	270.90	567.00	3070	63.00	21.43	12.83	4.22	2.53	0.84	6890	2.55	0.52	1325.40	2900.00	1510.00	910.00	625.00	280.00	4000	2.87	2.63	25.0	8.20	1

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου
ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»

Παράρτημα Γ. Βιβλιογραφικά δεδομένα που δεν αξιολογήθηκαν σύμφωνα με EFNARC

Ο ακόλουθος πίνακας συμπληρώθηκε σύμφωνα με τα δεδομένα που περιέχονται στις βιβλιογραφικές αναφορές των Safhi et al, Guru et al, που αναγράφονται στην Ενότητα Βιβλιογραφία Α, καθώς και σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές των Sabih et al, Mawlod et al, Galobardes et al, Shon et al, Dhir et al, Adu-Amankwah et al, που αναγράφονται στην Ενότητα Βιβλιογραφία Β.

Υπόμνημα:

	= δεδομένο από κανονισμοί
	= δεδομένο από άλλη βιβλιογραφική πηγή
	= δεδομένο ως μέση τιμή αντίστοιχών του
	= δεδομένο από πειραματικά δεδομένα

#	water		cement		filler							fine aggregates										output data	
	quantity	specific surface	quantity	specific surface	quantity	D90	D70	D50	D30	D10	specific surface	specific gravity	sphericity Sa	quantity	D90	D70	D50	D30	D10	Dmax	fineness modulus		specific gravity
	kg/m3	cm2/g	kg/m3	cm2/g	kg/m3	μm	μm	μm	μm	μm	cm2/g	g/cm3	-	kg/m3	μm	μm	μm	μm	μm	μm	g/cm3	g/cm3	
151	209.00	9140	300.00	9140	80.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
152	180.00	9140	500.00	9140	100.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	0
153	180.00	9140	300.00	9140	150.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
154	210.00	9140	400.00	9140	200.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
156	155.93	9140	419.00	9140	84.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	0
157	210.00	9140	500.00	9140	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
158	178.60	9140	380.00	9140	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
159	150.00	9140	500.00	9140	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	0
160	148.20	9140	300.00	9140	80.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
161	155.93	9140	419.00	9140	84.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	0
162	212.42	9140	403.00	9140	91.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
164	148.20	9140	350.00	9140	40.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1

Αγαπούλα Παπακωνσταντίνου
ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών»

165	200.90	405.00	9140	85.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
166	270.00	450.00	9140	150.00	75.00	28.00	9.80	4.20	1.00	23350	2.85	0.72	1350.00	1530.77	1069.23	750.00	449.00	140.00	2000	2.53	2.60	1
167	275.86	545.25	3115	293.10	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1073.26	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
168	274.48	544.64	3115	293.93	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1076.32	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
169	273.38	544.59	3115	292.91	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1080.49	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
170	271.99	543.97	3115	293.74	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1083.59	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
171	270.68	545.72	3115	292.51	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1087.07	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
172	292.94	514.80	3115	277.86	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1072.67	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
173	291.41	515.91	3115	278.46	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1074.99	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
174	290.38	515.74	3115	277.37	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1079.16	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
176	290.58	513.93	3115	277.56	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1079.90	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
178	293.86	516.13	3115	278.79	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1068.05	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
179	292.78	517.57	3115	277.67	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1071.02	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0
180	291.62	516.96	3115	278.37	30.00	20.00	18.00	12.00	2.00	3600	2.12	0.86	1073.69	1023.00	684.00	522.00	418.00	314.00	1110	2.26	2.60	0