



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού και

Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων

“ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ.”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΥΛΑΔΑΡΙΝΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Κοκόσης Αντώνιος

ΑΘΗΝΑ 2021

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, Αντώνη Κοκόση καθώς και τους ερευνητές Δημήτρη Φούφλια, Μανώλη Βασιλειάδη, Θοδωρή Δαλαμάγκα, Θανάση Γεντίμη, όπως και τη συμφοιτήτριά μου Φωτεινή Μιχαλοπούλου για την πολύτιμη βοήθεια και την τεχνογνωσία που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τον όμιλο TITAN για την παραχώρηση των δεδομένων λειτουργίας των μύλων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του τελικού μοντέλου, καθώς και τον σύμβουλο διεύθυνσης κ. Ιωάννη Μαρίνο για την εποπτεία και την καθοδήγηση μέσα στις ιδιαιτερότητες της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου.

Ευχαριστώ ακόμη την οικογένεια και τα κοντινά μου πρόσωπα για την υπομονή και τη συμπαράσταση που έδειξαν τον τελευταίο χρόνο.

Περίληψη

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η παρουσίαση μιας μεθόδου ενσωμάτωσης δεδομένων με συστημικό και συστηματικό τρόπο σε μαθηματικά μοντέλα διατηρώντας τις βασικές αρχές των συμβατικών υπολογιστικών προτύπων. Η μέθοδος αναβαθμίζει συμβατικές παραμέτρους αναλυτικών μοντέλων σε έξυπνες συναρτήσεις τροφοδοσίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω αντιστροφή του προβλήματος. Η μέθοδος θα εφαρμοστεί για την προτυποποίηση της λειτουργίας ενός κυκλώματος άλεσης τσιμέντου. Το μοντέλο είναι βασισμένο σε φυσικές εξισώσεις μεταφοράς μάζας και θεωρίας θραύσης και συνδυάζει δεδομένα προσομοίωσης και πραγματικών δεδομένων λειτουργίας για την προσαρμογή του. Ο τρόπος που προηγούμενη έρευνα έχει επιχειρήσει αυτή την προσέγγιση είναι μέσω παλινδρόμησης παραμέτρων του μοντέλου, ελαχιστοποιώντας το υπολογιζόμενο σφάλμα. Σε αυτή την έρευνα οι παράμετροι αποτελούν ένα επιπλέον στρώμα data based μοντελοποίησης. Ένας αριθμός παραμέτρων του αναλυτικού μοντέλου επιλέγονται για να μετασχηματιστούν σε συναρτήσεις των μεταβλητών εισόδου του συστήματος. Οι παράμετροι αυτές παλινδρομούνται σε κάθε πειραματικό σημείο ξεχωριστά. Οι τιμές των προσαρμοσμένων τιμών μαζί με τις αντίστοιχες μεταβλητές εισόδου χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου με σκοπό να εξάγουμε ένα data based μοντέλο που θα περιγράφει τις σχέσεις μεταξύ αυτών. Τέλος, οι συναρτήσεις αυτές αντικαθιστούν τις σταθερές παραμέτρους στο αναλυτικό μοντέλο. Το μοντέλο που προκύπτει φαίνεται να αποδίδει καλύτερα από το συμβατικό σε ότι αφορά την πρόβλεψη του Blaine του προϊόντος ενώ το υπολογιστικό κόστος που προστίθεται λόγω του νευρωνικού μοντέλου είναι αμελητέο. Παρατηρείται 28,0% βελτιωμένη ακρίβεια σε παρεμβολή 17,4% σε προεκβολή. Σε σύγκριση,

αμιγώς data based μοντέλα εκπαιδευμένα σε ίδιο μέγεθος δεδομένων επιτυγχάνουν επιπλέον 64,0% και 31,9% βελτιωμένη ακρίβεια αντίστοιχα επί του υβριδικού μοντέλου. Η κατανομή των διαμέτρων των σωματιδίων που υπολογίζεται από το υβριδικό μοντέλο φαίνεται να είναι σε σχετική συμφωνία με την πειραματικά προσδιορισμένη. Οι επιπλέον βαθμοί ελευθερίας που του προσδίδονται από τις συναρτήσεις επιτρέπουν στο μοντέλο να εκφράσει τη σχέση μεταξύ των δεδομένων που το αναλυτικό μοντέλο δεν μπορεί λόγω της δυσκαμψίας των σταθερών παραμέτρων, ενώ διατηρεί τις ιδιότητες της φυσικής αντιστοιχίας ενός αναλυτικού μοντέλου. Συμπεράσματα για την επίδραση μεταβλητών που δρουν στον σφαιρόμυλο εξάγονται από τις συναρτήσεις που παράγονται από το νευρωνικό μοντέλο και λαμβάνουμε μια ενδότερη ματιά στον μηχανισμό θραύσης που επικρατεί στις συνθήκες λειτουργίας του μύλου μας. Ακόμη, λαμβάνεται μια απεικόνιση της αξονικής μεταβλητότητας της κατανομής των διαμέτρων των σωματιδίων του τσιμέντου στον μύλο και στην έξοδο. Οι προσομοιώσεις του αναλυτικού μοντέλου, καθώς και η παλινδρόμηση των παραμέτρων εκτελούνται στο λογισμικό gPROMS Model Builder και το ενσωματωμένο πακέτο Validation αντίστοιχα. Η προεπεξεργασία και διαχείριση των δεδομένων καθώς και η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων έγιναν στο περιβάλλον του Colaboratory σε Python μέσω της βιβλιοθήκης του tensorflow και του API, Keras Το μοντέλο αποτελείται από ισοζύγια μάζας 10 διαστημάτων διαμέτρων σωματιδίων αξονικώς κατανεμημένων σε κάθε διαμέρισμα του μύλου, καταλήγοντας σε ένα σύστημα 20x20 2^{ης} τάξης συνήθως διαφορικών εξισώσεων. Σε κάθε ισοζύγιο μάζας περιλαμβάνονται φαινόμενα συναγωγής, διάχυσης και θραύσης στερεών σωματιδίων. Τα δεδομένα λειτουργίας του μύλου και της ποιότητας του προϊόντος παραχωρούνται από το εργοστάσιο τσιμέντου Καμαρίου του TITAN.

Abstract

Data-driven models hold significant promises to improve modelling capabilities. Their ability includes the development of deep learning using input-output relationships, model reduction of complex systems and the development of embedded surrogates to improve lower-accuracy models. Cement production offers notable challenges in the analysis of two-phase heterogeneous mixtures considering flow with distributed solid particles as in the case of ball mills. Since cement plants involve energy intensive processes, the development of good models could assist in significant reductions of energy consumption, and the better use of design parameters to improve the process operation and to meet quality standards. Modelling challenges include the low accuracy of constructions that rely solely on first principles, the need to customize the models using online measurements, and an ambition to reduce the complex space into a simpler, agile constructions to use for decision support.

The use of data analytics in complex models of the cement industry remains unclear. To that purpose, the paper explains a generic and systematic approach in the development of embedded models that could be further used for model reduction. The systems approach makes a structured and systematic use of data as they are produced at three distinct stages: simulation assignments by means of spatial differential equations, optimization runs that regress parameters for each simulation, and deep learning training that converts parameters into functions of system variables. Simulation models refer to steady-state operations of ball mills integrated to produce solid breakage in closed circuit grinding models formulated as differential equations with parameters treated as degrees of freedom. Simulations use the gPROMS Model Builder with its built-in validation module. Mass balances involve 10 particle size intervals axially distributed for each compartment of the ball mill, eventually resulting in 20 by 20 systems of second-order ODEs. For each mass balance, the equations include convective mass transfer, diffusion, and breakage phenomena. Quadratic optimization is subsequently assigned to regress real-life data available from the industrial site. For the dry cement plant, different sets of simulations are repeated for a wide range of operating conditions and product specs. The model best matching experimental data is used to predict the axial variability of particle size distribution of the cement inside the mill along with a Blaine product fineness prediction. Combined with optimization, simulation runs eventually produce sets of input-output data where inputs are the process input (or specs) with the output assigned as the best set of regressed parameters from the quadratic optimization. The data populations are used to train deep learning models and yield process parameters now as functions of the system input. Rather than conventional models where parameters are regressed to minimize errors, the proposed model is producing model parameters as functions of the system variables. Deep learning methods rely on ANNs and are compared with conventional models available using conventional regression methods. The approach can be used to reverse-engineer information flows by considering the process output as input and the physical input as output. In such versions the approach can be used to point design features that could be adjusted to improve energy efficiency or environmental performance.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	6
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	9
1.1. Βιομηχανία του τσιμέντου και προκλήσεις	9
1.2. Ο ρόλος της μαθηματικής προτυποποίησης	10
1.3. Στόχος αυτής της μελέτης	11
Κεφάλαιο 2. Διεργασίες και Υπολογιστικές προκλήσεις	13
2.1. Η παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου	13
2.1.1. Ξηρή Επεξεργασία	13
2.1.2. Υγρή Επεξεργασία.....	15
2.2. Προκλήσεις που καλείται να λύσει η μαθηματική προτυποποίηση στη βιομηχανία του τσιμέντου	16
2.3. Προβλήματα στα υπάρχοντα μοντέλα	18
2.4. Νέες Γενιές Μοντέλων	20
2.4.1. Μέθοδοι Πεπερασμένων Στοιχείων	20
2.4.2. Μοντέλα Μειωμένης Τάξης.....	21

2.4.3. Εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στη βιομηχανία του τσιμέντου	22
Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία.....	24
3.1. Βασική Διεργασία	24
3.2. Συμβατικά μοντέλα επίλυσης και ολοκλήρωσης εξισώσεων.....	25
3.3. Προκλήσεις που καλείται να λύσει η προτεινόμενη μέθοδος	29
3.4. Γενική παρουσίαση μεθοδολογίας.....	30
Κεφάλαιο 4. Υλοποίηση και Αποτελέσματα.....	31
4.1. Βέλτιστη αξιοποίηση δεδομένων	31
4.2. Αναλυτικό μοντέλο	38
4.2.1. Μοντέλο μύλου	38
4.2.2. Μοντέλο διαχωριστή	50
4.3. Παλινδρόμηση μοντέλου και παρουσίαση αποτελεσμάτων	55
4.4. Δημιουργία και αξιοποίηση δεδομένων	57
4.5. Νευρωνικό μοντέλο	57
4.5.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων υβριδικού μοντέλου	59
4.6. Αμιγώς data based μοντέλου.....	60
4.7. Σύγκριση και επαλήθευση	64
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα - Συζήτηση	79

Κεφάλαιο 6. Πρόταση για μελλοντική έρευνα.....	84
Κεφάλαιο 7. Βιβλιογραφία	86
Κεφάλαιο 8. Παράρτημα	88

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1. Βιομηχανία του τσιμέντου και προκλήσεις

Η σημασία του τσιμέντου στη σύγχρονη κοινωνία είναι αδιαμφισβήτητη, είναι το βασικό συστατικό του σκυροδέματος, του πιο ευρέως χρησιμοποιούμενου κατασκευαστικού υλικού στη μοντέρνα δόμηση.

Τα κτήρια, οι γέφυρες, οι δρόμοι, οι πόλεις μας έχουν χτιστεί πάνω από σκυρόδεμα τον τελευταίο ενάμιση αιώνα λόγω της δύναμης, και της μακροζωίας του. Η παραγωγή και διανομή του τσιμέντου είναι μια βιομηχανία που εκτιμάται να φτάσει τα 600 δισεκατομμύρια δολάρια σε έσοδα μέχρι το 2025. Οι κλίμακες που περιγράφουν τη βιομηχανία του τσιμέντου είναι μεγάλες και η επίδραση που έχει στο περιβάλλον και την παγκόσμια οικονομία είναι ανάλογη. Η δυναμικότητα της αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια καθώς η δόμηση των πόλεών μας βασίζεται στην αφθονία του, οι ανάγκες αυτών σε τσιμέντο αυξάνονται χρόνο με τον χρόνο. Η παραγωγή του τσιμέντου είναι μια από τις πιο ενεργειακά απαιτητικές βιομηχανίες παγκοσμίως, έχει δυναμικότητα 4.5 δισεκατομμύρια τόνους τσιμέντου τον χρόνο και καταναλώνει το 2% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Αποτελείται από εκ φύσεως χαμηλής απόδοσης διεργασίες όπως αυτή της ψιλής άλεσης. Το 60% της συνολικής ενέργειας που απαιτείται κατά την παρασκευή του τσιμέντου καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της άλεσης των πρώτων υλών και του clinker. Η κατανάλωση καυσίμων είναι επίσης πολύ υψηλή και αφορά κυρίως τη διεργασία της θερμικής επεξεργασίας των πρώτων υλών, όπου το μείγμα φτάνει σε θερμοκρασίες 1450°C και μετατρέπεται στο ενδιάμεσο προϊόν, το clinker. Είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συνεισφέρουν στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, μια εκτίμηση είναι ότι είναι υπεύθυνη για το 8% της ετήσιας ανθρωπογενούς παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα [13], εκπομπές που ανέρχονται σε 1.7 δισεκατομμύρια τόνους τον χρόνο. Η παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου ξεκίνησε στα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Αν και έχουν παρέλθει σημαντικές

βελτιώσεις στις διεργασίες που την απαρτίζουν, τα περισσότερα και μεγαλύτερα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου που είναι σε λειτουργία σήμερα έχουν ζωή αρκετών δεκαετιών. Σήμερα οι τσιμεντοβιομηχανίες δεν μπορούν παρά να συμμορφωθούν στους ολοένα και αυστηρότερους περιορισμούς στην ενεργειακή σπατάλη και εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Η μετάβαση των μονάδων επεξεργασίας σε νεότερα, πιο ενεργειακά αποδοτικά είναι καλή αλλά όχι πάντα εφικτή λύση για μερικά εργοστάσια καθώς το κόστος εγκατάστασης των νέων αλλά και το κόστος της παύσης της παραγωγής καθιστά μια τέτοια ενέργεια ασύμφορη.

1.2. Ο ρόλος της μαθηματικής προτυποποίησης:

Η βέλτιστη λειτουργία των ήδη υπαρχόντων μέσω αποτελεσματικής προτυποποίησης των μονάδων είναι επίσης ικανή να αποφέρει μεγάλα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Μαθηματική προτυποποίηση διεργασιών αξιοποιείται σε κάποια μορφή της από κάθε βιομηχανία είτε για λόγους βελτιστοποίησης, είτε για ρυθμιστικούς σκοπούς, είτε για πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός συστήματος. Η δυνατότητα της έστω και προσεγγιστικής πρόβλεψης των ιδιοτήτων του προϊόντος μιας διεργασίας σε πιθανή μεταβολή κάποιων παραμέτρων αυτής αποφέρει σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και κόστους. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις σε αντίθεση με τα πειράματα είναι γρήγορες και οικονομικές, αυτοματοποιούνται και δεν περιορίζονται από ελλείψεις και δυναμικότητες. Οι σύγχρονες γραμμές παραγωγής λειτουργούν σε στενά όρια διακύμανσης στις παραμέτρους του προϊόντος που πρέπει να παραγάγουν, στη σύσταση των εκπομπών τους, στο λειτουργικό κόστος τους και σε παραμέτρους που σχετίζονται με την ασφάλεια των χειριστών της διεργασίας. Υπάρχει ανάγκη τόσο για δυναμικά όσο και για μόνιμης κατάστασης μοντέλα. Τόσο για μεγάλου βαθμού λεπτομέρειας όσο και ποιοτικά μοντέλα. Τόσο για μοντέλα πρόβλεψης σε παρεμβολή των πειραματικών δεδομένων όσο και σε προεκβολή. Οι διεργασίες της βιομηχανίας του τσιμέντου έχουν αποδειχτεί δύσκολες στην

μαθηματική προτυποποίησή τους. Περιλαμβάνουν περίπλοκες δυναμικές ροής στερεών σωματιδίων και θραύσης, μεγάλες χρονικές σταθερές και κινηματικές όπως η ροή και μεταφορά θερμότητας σε μείγμα θερμού αέρα και σκόνης σε αεριοκυκλώνες που δεν είναι εφικτό να μοντελοποιηθούν με κλασικές μεθόδους. Στην πράξη, γίνεται ως επί το πλείστον χρήση εμπειρικών σχέσεων και απλοϊκών ρυθμιστικών τεχνικών για την εξασφάλιση της σταθερότητας της λειτουργίας των επιμέρους μονάδων. Για σχεδιαστικές αποφάσεις συχνά χρησιμοποιούνται φυσικά μοντέλα εργαστηριακής κλίμακας. Με τη μαζική λήψη δεδομένων λειτουργίας μέσω on-line μετρήσεων πλέον τίθεται θέμα βέλτιστης αξιοποίησης των δεδομένων για την ανάπτυξη καλύτερης ποιότητας μοντέλων και τη βελτίωση των ήδη υπαρχόντων. Τα data based μοντέλα μηχανικής μάθησης καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, ιδιαίτερα χρήσιμων στη βιομηχανία του τσιμέντου. Χρησιμοποιούν αλγορίθμους ελαχιστοποίησης σφάλματος για προβλήματα βέλτιστης προσαρμογής διχοτόμησης και ομαδοποίησης σε διαθέσιμα δεδομένα. Το πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι η ευκολία εφαρμογής τους, η διαθεσιμότητα των υπολογιστικών βιβλιοθηκών με πληθώρα εφαρμογών και το ότι δεν απαιτείται ιδιαίτερη γνώση της διεργασίας ή και φαινομενολογική ανάλυση της για την εφαρμογή τους. Ακόμα, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που εξαγουν τις ουσιαστικές μεταβλητές ενός συστήματος μειώνοντας έτσι την υπολογιστική πολυπλοκότητα, συνδυαστικές μέθοδοι που κάνουν χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης δρουν παράλληλα για την αναίρεση των σφαλμάτων αναλυτικών μοντέλων.

1.6. Στόχος αυτής της μελέτης

Με την παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύουμε στη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης και δεδομένων προσομοιώσεων για την αναβάθμιση των αναλυτικών προτύπων περίπλοκων διεργασιών με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμεταλλεύονται με καλύτερο τρόπο τα διαθέσιμα δεδομένα. Ένα embedded

μοντέλο αναλυτικών και νευρωνικών μοντέλων δύναται να εκμεταλλευτεί τη χρηστικότητα και τις ικανότητες προεκβολής ενός αναλυτικού προτύπου και την προσαρμοστικότητα ενός black box μοντέλου. Με το πέρας της μελέτης μας, αποσκοπούμε να έχουμε αναπτύξει ένα μοντέλο της διεργασίας της άλεσης τσιμέντου το οποίο είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί μετά από αντιστροφή των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του για σχεδιαστικές και λειτουργικές αποφάσεις, ως first principles derived μοντέλο και να επιτυγχάνει υψηλή προβλεπτική ικανότητα σε κρίσιμες μετρήσεις όπως το Blaine ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως soft sensor.

Κεφάλαιο 2. Διεργασίες και Υπολογιστικές προκλήσεις

2.1. Παραγωγική Διαδικασία του Τσιμέντου

Η παραγωγή τσιμέντου σήμερα ακολουθεί δύο μεθόδους την ξηρή και την υγρή καθώς και δύο παραλλαγές, την ημίξηρη και την ημιυγρή. Ενώ για το μεγαλύτερο μέρος του 20ού αιώνα η κυρίαρχη μέθοδος σε Ευρώπη και Αμερική ήταν η υγρή, σήμερα τα νέα εργοστάσια σχεδιάζονται για ξηρή επεξεργασία ενώ τα ήδη υπάρχοντα μετασχηματίζονται και αυτά σε ξηρή ή ημίξηρη.

2.1.1. Ξηρή Επεξεργασία

Αρχικά εξορύσσονται τα πρωτογενή υλικά (κυρίως ασβεστόλιθος), καθώς και πρόσθετα υλικά όπως ο πηλός και η άμμος, σχιστόλιθος, αργιλασβέστιο, μεταλλικός σίδηρος κ.α. Στη συνέχεια τα υλικά περνάνε από τη διεργασία του σπαστήρα όπου αυτός μπορεί να είναι σε μια ή συνηθέστερα σε δύο βαθμίδες σε σειρά. Από τον σπαστήρα το προϊόν εξέρχεται με δραστικά μειωμένη διάμετρο σωματιδίων, τυπικά μικρότερη από 50mm συχνά μικρότερη των 25mm. Στη συνέχεια ο ασβεστόλιθος και ένα μέρος των υπόλοιπων υλικών περνάνε για προανάμιξη σε blending bed, όπου δημιουργείται ένα πρώτο μείγμα, ενώ το περίσσειμα αποθηκεύεται σε σιλό. Στη συνέχεια, στο raw meal προστίθεται από σιλό συγκεκριμένη ποσότητα άμμου, σχιστολίθου, πηλού (οξειδία πυριτίου, σιδήρου, αλουμινίου και μαγνησίου) και άλλων υλικών, ούτως ώστε το τελικό μείγμα να έχει τις επιθυμητές αναλογίες ασβεστίου, πυριτίου αλουμινίου και σιδήρου, ανάλογα με τις προδιαγραφές του προϊόντος που θέλουν να επιτευχθούν. Για την παρασκευή του Portland cement, το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο τσιμέντο παγκοσμίως, το raw mix αποτελείται από 83% ασβεστόλιθο, 5% άμμο, 3% πηλό και 9% άλλα υλικά.

Στη συνέχεια το μείγμα (raw mix) περνάει στον raw mill grinder, που μπορεί να είναι vertical roller mill ή οριζόντιος σφαιρόμυλος όπου ταυτόχρονα το raw mix ξηραίνεται, αλέθεται και

αναμιγνύεται. Η τροφοδοσία ξηραίνεται μέσω θερμού αέρα που έρχεται από τον πρώτο αεριοκυκλώνα του προθερμαντήρα και αλέθεται σε μικρά σωματίδια της επιθυμητής διαμέτρου, συνήθως μεγαλύτερο από Blaine: $4100 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$. Το προϊόν καταλήγει σε σιλό ομογενοποίησης και αποθήκευσης raw mix silo όπου ανακατεύεται και ομογενοποιείται. Σε αυτήν την κατάσταση, το μείγμα περιέχει υγρασία μικρότερη του 1%. Το προϊόν αυτό κατευθύνεται προς τον προθερμαντήρα. Ο προθερμαντήρας είναι ένα σύστημα αεριοκυκλώνων έως 6 βαθμίδων (συνήθως 5) οι οποίοι θερμαίνουν την τροφοδοσία με θερμό αέρα που έρχεται από τον θάλαμο καύσης και την κάμινο και διαχωρίζεται ο θερμός αέρας από τα σωματίδια του raw mix θερμαίνοντάς τα παράλληλα σε θερμοκρασία περίπου 450°C . Μέσα στους κυκλώνες παίρνει μέρος η απομάκρυνση των ελευθέρων και κρυσταλλικών νερών που έχουν απομείνει καθώς και μέρος του calcining $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (απομάκρυνση του CO_2 από τα ανθρακικά). Ο θερμός αέρας που βγαίνει από τον πρώτο αεριοκυκλώνα περιέχει πολύ μικρής διαμέτρου σωματίδια και περνάει από electrostatic precipitator όπου αυτά απομακρύνονται και μεταφέρονται στο raw meal όπου εισέρχεται στη συνέχεια στον calciner, έναν χώρο που θερμαίνεται ξεχωριστά από θάλαμο καύσης, όπου γίνεται καύση στερεών (coal) και εναλλακτικών καυσίμων. Στον calciner αναπτύσσεται θερμοκρασία έως και 900°C και λαμβάνει μέρος το μεγαλύτερο μέρος του calcination (έως και 96%) και μετά ετοιμάζονται για εισαγωγή στην κάμινο. Κατά μήκος της καμίνου αναπτύσσεται όλο και μεγαλύτερη θερμοκρασία και πραγματοποιούνται διαφορετικές αντιδράσεις. Στην αρχή της πραγματοποιείται το υπολειπόμενο calcination που δεν είχε γίνει στον calciner. Στη συνέχεια περνάει από μεταβατική ζώνη όπου θερμαίνεται περαιτέρω μέχρις ότου, σε θερμοκρασία έως και 1450°C , πραγματοποιείται δημιουργία υγρής φάσης και clinkerization. Πρόκειται για εξώθερμη αντίδραση που μετατρέπει το raw meal στο επιθυμητό συστατικό του τσιμέντου, το clinker. Το clinker που δημιουργείται, λόγω μερικής τήξης και επαναστερεοποίησης βρίσκεται σε σωματίδια διαμέτρου 1-40 (5-10) mm. Για την ανάπτυξη αυτής της θερμοκρασίας, στο

τέλος της καμίνου γίνεται καύση φυσικού αερίου. Στα τελευταία μέτρα του kiln γίνεται ψύξη του clinker έως περίπου τους 1240°C. Στην συνέχεια το clinker κατευθύνεται στον ψυκτήρα μέσω του οποίου απάγεται θερμότητα (ψυχραίνεται στους 100-120°C) από το προϊόν και ανακατευθύνεται ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αέρας καύσης στον calciner.

2.1.2. Υγρή Επεξεργασία

Η υγρή μέθοδος σήμερα προτιμάται συνήθως αν τα raw materials περιέχουν υγρασία μεγαλύτερη του 20%. Κατά την υγρή μέθοδο, το raw mix περνάει από wash mill όπου εκπλένεται και εναποτίθεται σε αυτό 32-40% νερό και αναμειγνύονται για τη δημιουργία πολτού. Ο πολτός μεταφέρεται στον μύλο. Η μεταφορά του πολτού από διεργασία σε διεργασία διευκολύνεται και η παραγωγή σκόνης μειώνεται. Επίσης η λειτουργία του μύλου απαιτεί μέχρι και 30% λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με την ξηρή λειτουργία, και το προϊόν είναι καλύτερα ομογενοποιημένο, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα καλύτερης ποιότητας clinker και κατ' επέκταση τσιμέντο. Η έξοδος του μύλου τροφοδοτείται κατευθείαν στην κάμινο, χωρίς την απαίτηση πύργου προθέρμανσης, όπου λαμβάνουν μέρος η ξήρανση του πολτού και η παραγωγή clinker σε ένα στάδιο. Καθώς η κάμινος εξυπηρετεί περισσότερες διεργασίες στην υγρή απ' ό τι στην ξηρή μέθοδο, το μήκος της καμίνου στην υγρή είναι μεγαλύτερο και έχει μεγαλύτερο χρόνο παραμονής. Η εξάτμιση του νερού επιβαρύνει ενεργειακά σε μεγάλο βαθμό την κάμινο. Συγκεκριμένα οι ενεργειακές απαιτήσεις της καμίνου υγρής μεθόδου είναι κατά περίπου 33% αυξημένες σε σχέση με αυτές της ξηρής μεθόδου. Μια παραλλαγή της υγρής μεθόδου, η ημιυγρή, που αποσκοπεί στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης της καμίνου, περνάει το slurry πρώτα από πρέσα φίλτρου ώστε να αφαιρέσει από την τροφοδοσία της καμίνου τα 2/3 του περιεχόμενου νερού. Η εξοικονόμηση ενέργειας στην κάμινο όμως αναιρείται σε έναν βαθμό από την απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια της πρέσας. Μερικές διατάξεις ακόμα περιλαμβάνουν και

προθερμαντήρα-ξηραντήρα πριν την κάμινο προσφέροντας μικρή αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας (ημίξηρη επεξεργασία). Στη συνέχεια το clinker αναμιγνύεται με γύψο (καθυστερεί την πήξη του τσιμέντου κατά την επαφή του με νερό), και σε μικρότερο βαθμό ασβεστόλιθο και άλλα πρόσθετα, ανάλογα με την επιθυμητή χρήση του προϊόντος, και περνάει από τον finish grinder mill από τον οποίο στην έξοδο το προϊόν εξέρχεται και περνάει μέσα από ψιλό πλέγμα. Τα σωματίδια που δεν καταφέρνουν να το διαπεράσουν απομακρύνονται και ανατροφοδοτούνται στην είσοδο του μύλου. Η ψιλή σκόνη που είναι το τσιμέντο πλέον κατευθύνεται προς αποθήκευση και διανομή.

2.2. Προκλήσεις της τσιμεντοβιομηχανίας που καλείται να λύσει η μαθηματική προτυποποίηση στη βιομηχανία του τσιμέντου:

Μύλοι άλεσης:

- Λόγω έλλειψης έμπιστων ή και οικονομικών υλικών αισθητήρων στην άλεση του τσιμέντου, η ανάπτυξη soft sensors είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον έλεγχο και ρύθμιση της διεργασίας. Η ειδική επιφάνεια του τσιμέντου (Blaine), μια από τις σημαντικότερες προδιαγραφές του παραγόμενου τσιμέντου δεν είναι άμεσα ποσοτικοποιήσιμη καθώς είναι μια μέτρηση που δεν μπορεί να παρθεί on-line. Δείγμα προϊόντος πρέπει να συλλεχθεί και να μετρηθεί με συσκευή μέτρησης διαπερατότητας αέρα. Λόγω της σημαντικότητας της παραμέτρου, αφού η ποιότητα του προϊόντος βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση από το Blaine μετρήσεις συνήθως παίρνονται κάθε ώρα λειτουργίας του κυκλώματος. Ακόμα και η ωριαία συχνότητα είναι αραιή και δεν

επαρκεί για τη σωστή ρύθμιση της διεργασίας. Υπάρχει ανάγκη για αξιόπιστο on-line measurement του Blaine ώστε ρυθμίσεις να γίνονται άμεσα και να μην κινδυνεύουμε να υπάρξει κακό batch.

- Ακόμα, είναι αναγκαία η ανάπτυξη soft sensors της κατανομής των διαμέτρων των σωματιδίων του παραγόμενου τσιμέντου. Η αντοχή στη θλίψη, ο χρόνος πήξης του σκυροδέματος και απαίτηση νερού του εξαρτώνται άμεσα από την ομοιογένειά της.
- Επίσης ακριβέστεροι αισθητήρες του επιπέδου πληρότητας των μύλων είναι μια ανάγκη για την παρακολούθηση των μύλων, καθώς οι ακουστικοί αισθητήρες είναι συχνά αξιόπιστοι μόνο για ποιοτικό προσδιορισμό της πληρότητας αφού είναι επιρρεπείς σε στρέβλωση των αποτελεσμάτων λόγω περιβάλλοντων θορύβων.

Περιστρεφόμενη Κάμινος:

- Ακόμα και σε εργοστάσια ξηρής επεξεργασίας ενεργειακές απαιτήσεις σε καύσιμα της καμίνου είναι πολύ υψηλές. Γίνεται προσπάθεια να αντικατασταθεί μέρος των συμβατικών καυσίμων (φυσικό αέριο, κάρβουνο, πετρέλαιο) με εναλλακτικά (βιοκαύσιμα, ηλεκτρικό ρεύμα από ΑΠΕ). Λόγω της ανάγκης ομογενών συνθηκών πύρωσης και σταθερότητας φλόγας, πρέπει η αναλογία και η τροφοδοσία των καυσίμων να είναι απόλυτα ελεγχόμενη. Τα οφέλη περιλαμβάνουν οικονομικότερη καύση, χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων και μικρότερη παραγωγή τέφρας.
- Λόγω της κλίμακας των διεργασιών, της δυναμικότητας που διαχειρίζονται, καθώς και των ακραίων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε πολλά μέρη της παραγωγής, είναι αναγκαία η παρακολούθηση παραμέτρων που σχετίζονται με την ασφάλεια και να επιβεβαιώνεται η σταθερότητα των διεργασιών ανά πάσα στιγμή.

Πύργος προθέρμανσης

Αεριοκυκλώνες και Calciner:

- Μεταφορά θερμότητας με CFD δείχνει πολύ καλή θέρμανση των σωματιδίων και σχεδόν ομογενείς θερμοκρασίες μέσα σε κάθε στάδιο του αεριοκυκλώνα. Οι θερμικές απώλειες από τον κυκλώνα συμβαίνουν μέσω των τοιχωμάτων του. Επομένως είναι απαραίτητη η πρόβλεψη των παραμέτρων της θερμοροής μεταξύ του αέρα που περιέχει τα σωματίδια και τα τοιχώματα των κυκλώνων. [Gurta and Nag (2000)]
- Πρόβλεψη χρόνου παραμονής με κινητικά μοντέλα. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά τη μοντελοποίηση των κυκλώνων calciners είναι η εκτίμηση του μέσου χρόνου παραμονής των σωματιδίων στους κυκλώνες. Ορισμένες εμπειρικές συσχετίσεις έχουν προταθεί για την πρόβλεψη του μέσου χρόνου παραμονής των σωματιδίων στους κυκλώνες. [Kang et al., 1989; Lede et al., 1987]

2.3. Προβλήματα στα υπάρχοντα μοντέλα

Ψιλή Άλεση:

Η μαθηματική προτυποποίηση των διεργασιών παραγωγής τσιμέντου είναι μια δύσκολη πρόκληση που μπορεί να αποφέρει μεγάλα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Κι αυτό διότι η διεργασία της άλεσης είναι περίπλοκη στη φύση της. Στους μύλους συγκεκριμένα, η δυναμική της ροής των στερεών σωματιδίων διαφόρων διαμέτρων και τοπικής σύστασης σε συνδυασμό με την τυχαιότητα των αποτελεσματικών κρούσεων καθιστούν αδύνατη τη ντετερμινιστική προτυποποίηση της διεργασίας. Ένας συνδυασμός μεταβλητών όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πληρότητα του μύλου και το πλήθος και η διάμετρος του μέσου ορίζει διαφορετικό μείγμα μηχανισμών

θραύσης που συμβαίνουν στον μύλο. Το πλήθος των παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία του μύλου είναι δυσβάσταχτο για τα θεωρητικά μοντέλα αδυνατούν να περιγράψουν επαρκώς τις περίπλοκες δυναμικές που συμβαίνουν στο εσωτερικό ενός μύλου. Η φύση της άλεσης απαιτεί μεγάλη λεπτομέρεια στην ανάλυση της διεργασίας. Συχνά η πυκνή διακριτοποίηση των σωματιδίων του τσιμέντου που γίνεται σε breakage and selection function models τα καθιστά πολύ υπολογιστικά «βαριά» για να χρησιμοποιηθούν για ρύθμιση της διεργασίας.

Ενώ first principles μοντέλα μύλων άλεσης μπορούν και έχουν χρησιμοποιηθεί για πληθώρα εργασιών, η δυσκολία ανάπτυξής τους και το συχνά μεγάλο υπολογιστικό τους κόστος τα καθιστά μη ελκυστικά για real time εφαρμογές.

Παραγωγή clinker (Κάμιнос):

Η περιστρεφόμενη κάμιнос είναι δύσκολη διεργασία για να εφαρμοστεί αυτόματη ρύθμιση. Έχει μεγάλη χρονική σταθερά και οι σχέσεις των μεταβλητών εισόδου και εξόδου είναι έντονα μη γραμμικές. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την απουσία αξιόπιστων αισθητήρων για σημαντικές παραμέτρους καθιστούν την ανάπτυξη ενός μοντέλου ρύθμισης tricky. Τα φυσικά μοντέλα κρίνονται «βαριά» και αδύναμα για αυτόν τον σκοπό. Για ρύθμιση της λειτουργίας της συνήθως η τσιμεντοβιομηχανία καταφεύγει σε χειροκίνητη ρύθμιση ή fuzzy controllers. Είναι εύκολα εφαρμόσιμοι και λύνουν τα παραπάνω προβλήματα. Εξ' ορισμού όμως, και αφού δεν βασίζεται σε μοντέλο, η μέθοδοι αυτοί δεν προσφέρουν τη βέλτιστη λειτουργία της διεργασίας, παρά μόνο τη σταθερότητα αυτής. Model Predictive Controllers με απλοϊκά μονοπαραμετρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται αλλά δεν επαρκούν για ουσιαστική βελτιστοποίηση.

Πύργος προθέρμανσης:

Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων είναι αδύνατο να υπάρξουν ενιαία για να περιγράψουν το κύκλωμα που απαρτίζεται από τους αεριοκυκλώνες, calciner, κάμινο και ψυκτήρα μαζί, άρα σαν μοντέλα δεν είναι πολύ χρήσιμα για ενεργειακή βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος. Βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στη μοντελοποίηση της ροής του ρευστού και τη μεταφορά θερμότητας στο στάδιο των αεριοκυκλώνων.

2.4. Νέες Γενιές Μοντέλων

2.4.1. Μέθοδοι Πεπερασμένων Στοιχείων:

Αν και δεν είναι ιδιαίτερα νέα τεχνική μοντελοποίησης, η σύγχρονη υπολογιστική ισχύς που είναι διαθέσιμη τους δίνει νέες δυνατότητες, λεπτομερέστερης ανάλυσης και αρκετά μεγάλης ακρίβειας σε ορισμένες κατηγορίες εφαρμογών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τη μοντελοποίηση συστημάτων δύσκολης γεωμετρίας και περίπλοκων αλληλεπιδράσεων συστημάτων υψηλής εντροπίας όπου η ντετερμινιστική προτυποποίηση δεν είναι επιλογή. Προσομοιωτές FEM όπως το ANSYS βρίσκουν εφαρμογές σε προβλήματα ροής σωματιδίων στους αεριοκυκλώνες και τη μεταφορά θερμότητας σε αυτά. Η εφαρμογή τους είναι τόσο δύσκολη όσο η διεργασία που περιγράφουν. Λόγω του ότι συνήθως πρόκειται για μοντέλα υψηλής διάστασης, δεν ενδείκνυνται για ρύθμιση διεργασιών. Σε διεργασίες άλεσης, όπου ακόμα και ο βαθμός λεπτομέρειας των FEM μοντέλων δεν επαρκεί για να προσεγγίσει επαρκώς την πραγματικότητα, περιορίζονται στη χρηστικότητα που έχουν στο να παρέχουν μια εικόνα της θραύσης στο εσωτερικό τους και ποιος μηχανισμός επικρατεί σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Ακόμα βρίσκουν εφαρμογή στη μελέτη στατικότητας των μύλων. Λόγω του ασύμμετρου βάρους που είναι κατανεμημένο στον μύλο και της ταχύτητας με τον οποίο περιστρέφεται, μεγάλες

δυνάμεις ασκούνται στα στηρίγματά του. Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων υποδεικνύουν τρωτά σημεία του κελύφους και των στηριγμάτων του μύλου όπου απαιτείται ενίσχυση.

2.4.2. Μοντέλα μειωμένης τάξης

Μέθοδοι μείωσης τάξης μοντέλων στοχεύουν στη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας μοντέλων υψηλού βαθμού λεπτομέρειας. Θυσιάζοντας μικρό μέρος της λεπτομέρειας της ανάλυσης μπορεί το σύστημα να γίνει γρηγορότερο και κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως model predictive controller. Ο μύλος, παραδείγματος χάριν, δεν υπάρχει λόγος να μελετηθεί ακτινικά αν πιστεύουμε πως η κατανομή των διαμέτρων των σωματιδίων του τσιμέντου μπορεί να εκτιμηθεί επαρκώς μόνο μέσω ανάλυσης της αξονικής μεταβλητής.

Principal Component Analysis είναι τεχνική μέσω της οποίας προσδιορίζεται ο βαθμός κατά τον οποίο μια μεταβλητή συνεισφέρει στη συνάρτηση υπολογισμού μιας μεταβλητής στόχου. Βάσει αυτής η προτυποποίηση συγκεκριμένων διεργασιών μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα μικρό μόνο μέρος των μεταβλητών που υπεισέρχονται στο σύστημα σαν είσοδοι. Κατά συνέπεια, μειώνεται η πολυπλοκότητα.

Επιπλέον είναι δυνατή η προσέγγιση υπολογιστικά περίπλοκων θεωρητικών μοντέλων με data-derived μοντέλα. Ένα first principles μοντέλο που μπορεί να αποτελείται από σύστημα διαφορικών εξισώσεων δύσκολων στη λύση και μεγάλης διακριτοποίησης, μετατρέπεται μέσω νευρωνικού δικτύου σε απλούστερο γραμμικό σύστημα που προσεγγίζει το αποτέλεσμα του θεωρητικού μοντέλου αλλά απαιτεί ένα κλάσμα του υπολογιστικού του χρόνου για να λυθεί.

2.4.3. Εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στη βιομηχανία του τσιμέντου:

Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται για πληθώρα εργασιών στη σύγχρονη τσιμεντοβιομηχανία:

- Χρησιμοποιούνται για πρόβλεψη ενεργειακών αναγκών σε ημερήσια ή και ωριαία βάση για τον προγραμματισμό και τα logistics των καυσίμων, βελτιστοποίηση λειτουργικών παραμέτρων σε μύλους και κάμινο για μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και ενεργειακής κατανάλωσης.
- Πρόβλεψη αστοχιών μέσω Unsupervised Learning αλλά και αναγνώριση των συνθηκών που οδήγησαν στην αστοχία.
- Λόγω της ικανότητας τους να προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τη συμπεριφορά μεταβλητών στα όρια του dataset στο οποίο εκπαιδεύονται, στη σύγχρονη βιομηχανία τα νευρωνικά μοντέλα κυριαρχούν στον τομέα των soft sensors.
- Πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών ενός μύλου με νευρωνικά δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης και Support Vector Regression ή και συνδυαστικά μοντέλα. Μοντέλα Γραμμικής Παλινδρόμησης και A.R.M. υποθέτουν γραμμικότητα στις σχέσεις των παραμέτρων εισόδου με την ενεργειακή απαίτηση. Παρόλο που οι πραγματικές σχέσεις που διέπουν τις παραπάνω μεταβλητές είναι ισχυρά μη γραμμικές, παρουσιάζουν καλά αποτελέσματα σε μικρές μεταβολές των μεταβλητών. Όμως ένας τυπικός raw μύλος άλεσης μέσα στη μέρα παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές στην ηλεκτρική κατανάλωση και τα παραπάνω μοντέλα δεν επαρκούν για την πρόβλεψή της.
- Παραγωγή μοντέλων αυτόματου ελέγχου για τη μονάδα της περιστρεφόμενης καμίνου. Εκεί γίνεται χρήση κυρίως recurrent neural networks και αλγορίθμων decision tree αλλά συνήθως αφορούν αποκλειστικά τον χειρισμό της καμίνου και όχι ενσωματωμένο σύστημα για όλο το

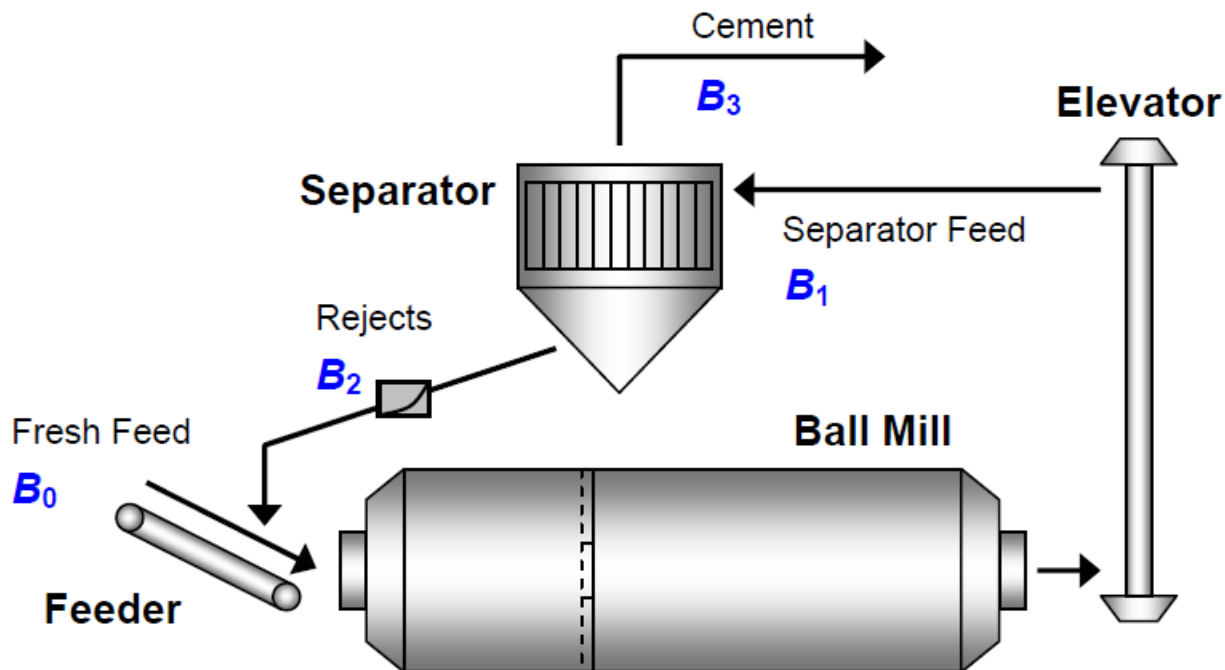
κύκλωμα calciner-καμίνου-ψυκτήρα. Μέσω τέτοιων εφαρμογών και με τη βελτιστοποίηση μέσω data based μοντέλων οι τσιμεντοβιομηχανίες παγκοσμίως καταφέρνουν 2-5% αυξημένη παραγωγικότητα, 2-5% μειωμένες απαιτήσεις καυσίμου, 1-3% μειωμένη απαίτηση ηλεκτρισμού, 20% μείωση των εκπομπών NOx και έως και 50% μείωση της απόκλισης free lime στο προϊόν, δηλαδή βελτιωμένη ομογενοποίηση. [πηγη]

Σε γενικές γραμμές τα data based μοντέλα δεν έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν για επιλογές σχεδιασμού. Η απόδοση αυτών των μοντέλων είναι απόλυτα εξαρτημένη από τη διαθεσιμότητα δεδομένων μεταβλητών που καλείται να αναλύσει. Οι κατασκευαστικές παράμετροι είναι εξ ορισμού αδύνατο να υπάρξουν σε επαρκώς μεγάλο dataset για τέτοιου τύπου εφαρμογές.

3. Μεθοδολογία:

3.1. Βασική Διεργασία:

Τα συστήματα άλεσης σε σύγχρονα εργοστάσια λειτουργούν σε κυκλώματα σφαιρόμυλου-αναβατήρα-διαχωριστή. Το clinker της τροφοδοσίας προέρχεται από τον ψυκτήρα της καμίνου και μαζί με πρόσθετα υλικά (ποζολάνη, γύψος, ασβεστόλιθος, ιπτάμενη τέφρα) τροφοδοτούνται με ή χωρίς προθράυση στην είσοδο του σφαιρόμυλου. Ο υπό εξέταση σφαιρόμυλος αποτελείται από δύο διαμερίσματα 4.89 m και 7.72 m αντιστοίχως, όπου περιέχονται μεταλλικές σφαίρες διαφόρων διαμέτρων. Η έξοδος του μύλου είναι συνδεδεμένη με αναβατήρα ο οποίος οδηγεί την έξοδο στην κορυφή ενός SEPAX Rotor Separator υψηλής απόδοσης. Από τον διαχωριστή τα ψιλά σωματίδια του τσιμέντου εξέρχονται ως προϊόν ενώ τα απορριπτέα σωματίδια επιστρέφουν ως ανατροφοδοσία στην είσοδο του μύλου. Ακόμη, ανεμιστήρες μέσα στο μύλο δημιουργούν ρεύμα αέρα που ξηραίνει και ψεκαστήρες νερού που ψύχουν το τσιμέντο και παρασέρνει τα πολύ ψιλά σωματίδια (σκόνη). Η σκόνη περισυλλέγεται από bag filter και ο αέρας ανακυκλοφορείται. Το παραγόμενο τσιμέντο είναι τύπου Portland και η προδιαγραφή στην έξοδο του μύλου είναι 4100 Blaine με μικρότερη του 2% παρακράτηση του σε κόσκινο διαμέτρου 45 μm.



Σχήμα 1:Γραφική αναπαράσταση του κυκλώματος άλεσης

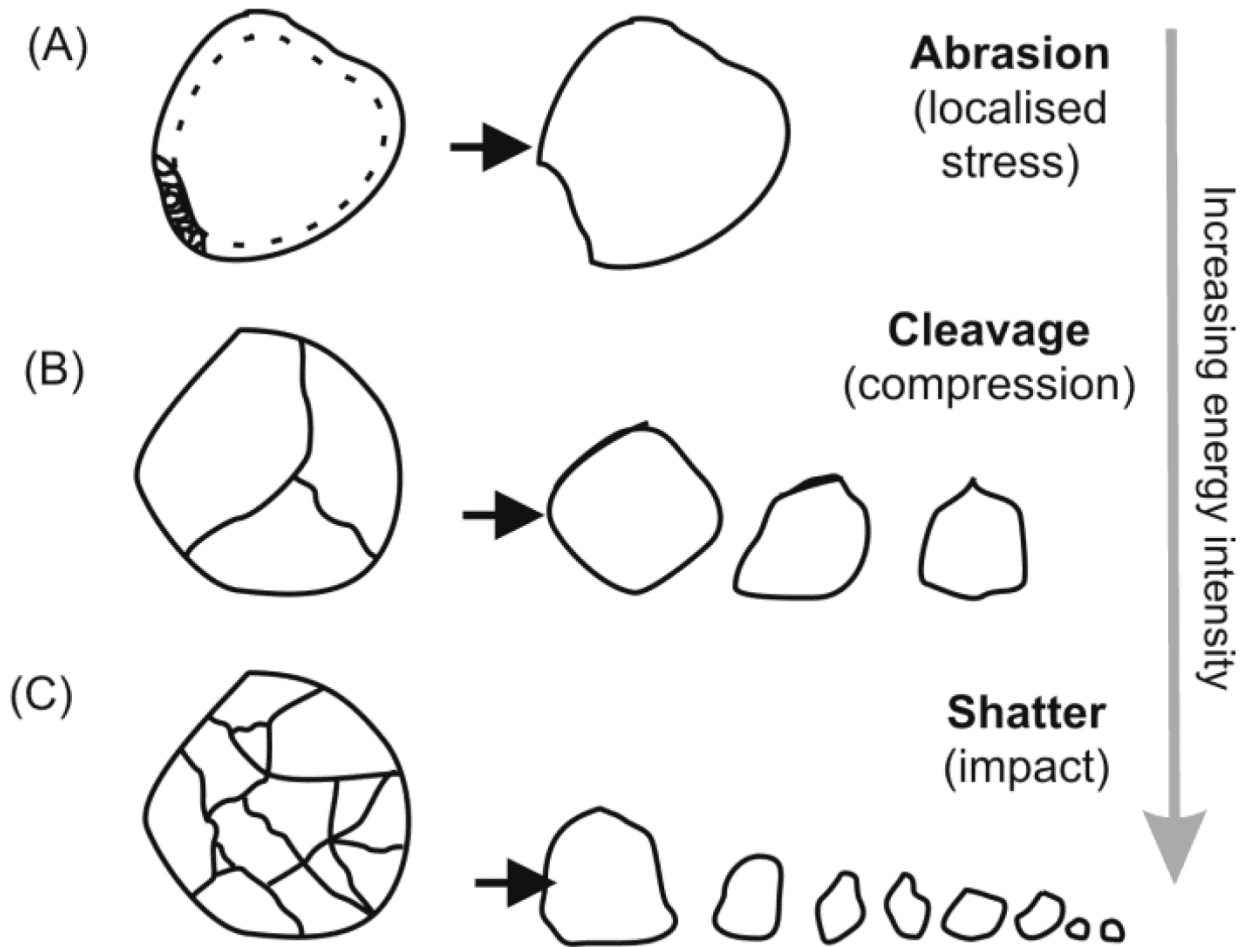
3.2. Συμβατικά μοντέλα επίλυσης και ολοκλήρωσης εξισώσεων:

Τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως για να προσομοιώσουν τη λειτουργία του σφαιρόμυλου μπορούν να χωριστούν σε φαινομενολογικά και σε data-driven. Οι raw και finish μύλοι περιβάλλονται από όμοιο κύκλωμα και έχουν κοινή λειτουργία. Με τη διαφορά ότι οι finish μύλοι επιδιώκουν προϊόν πιο μικρής διαμέτρου. Οι μέθοδοι μαθηματικής προτυποποίησης που χρησιμοποιούνται λοιπόν είναι κοινές και στους δύο.

Τα φαινομενολογικά - ημιεμπειρικά μοντέλα προσεγγίζουν βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο κύκλωμα της άλεσης και περιγράφουν τη συνολική διεργασία ως το σύνολο αυτών. Βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε στατιστικές συσχετίσεις των μεταβλητών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν τη λειτουργία της διεργασίας και του κυκλώματος.

Φαινομενολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό είναι τα Breakage and Selection function models και τα Population Balance Models:

- Τα Population Balance μοντέλα διακριτοποιούν τα σωματίδια του τσιμέντου σε κλάσεις ανάλογα με τη διάμετρο τους. Με τη χρήση πραγματικών δεδομένων λειτουργίας ορίζουν τις στατιστικές ιδιότητες της κάθε κλάσης. Με τη μέθοδο αυτή εξάγουν παραμέτρους μετατροπής και διασποράς χρόνου παραμονής της κάθε κλάσης και ορίζει ισάριθμα ισοζύγια μάζας μέσω αυτών. Ο μηχανισμός της μετατροπής δεν υπεισέρχεται στην ανάλυση. Ενδείκνυται για μόνιμης κατάστασης ανάλυση του μύλου και για λειτουργία όπου συμβαίνουν περισσότεροι από ένας μηχανισμοί θραύσης. Λειτουργούν εξίσου καλά σε διαφορετικούς τύπους μύλων λόγω της γενικότητας της προσέγγισης.
- Τα Breakage and Selection function μοντέλα επιχειρούν να περιγράψουν τα φαινόμενα της θραύσης με βάση τη θεωρία θραύσης στερεών σωματιδίων. Η θεωρία βασίζεται στην παραδοχή ότι αν η ενέργεια μιας κρούσης υπερβαίνει την ενέργεια δεσμού (Bond Energy) του σωματιδίου η κρούση είναι αποτελεσματική και το σωματίδιο μετατρέπεται μια κατανομή νέων σωματιδίων. Αξιοποιούν πίνακες κατανομής διαμέτρων σωματιδίων και πιθανοτήτων αποτελεσματικής κρούσης ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων και τις συνθήκες-μηχανισμούς άλεσης. Δίνουν τη δυνατότητα πιο λεπτομερούς και πολυπαραμετρικής ανάλυσης. Στην ανάλυση αυτή οι περισσότερες παράμετροι έχουν φυσική σημασία και υπάρχει καλύτερη δυνατότητα προεκβολής του μοντέλου για νέες συνθήκες λειτουργίας. Είναι φανερό ότι αυτή η προσέγγιση απαιτεί βαθύτερη γνώση τόσο των δυναμικών της συνολικής διεργασίας όσο και των εργαλείων που χρειάζονται για τη λύση της συνήθως περίπλοκης μαθηματικής οντότητας που προκύπτει.



Σχήμα 2: Γραφική αναπαράσταση μηχανισμών θραύσης στερεών σωματιδίων.

[12]

Για τη μοντελοποίηση κυκλωμάτων άλεσης κυρίως στο στάδιο του σχεδιασμού, χρησιμοποιούνται και φυσικά μοντέλα (μινιατούρες). Αποτελούν εξ' ορισμού εμπειρική προσέγγιση και αποφέρουν καλά αποτελέσματα που μεταφέρονται αξιόπιστα σε μεγαλύτερη κλίμακα. Παρόλα αυτά πρόκειται για δύσκολη και ακριβή μέθοδο ενώ δεν προσφέρει την ίδια ευκολία και δυνατότητα επιλογής στα πειράματα όσο τα μαθηματικά μοντέλα.

Τα data-driven μοντέλα χρησιμοποιούν αλγόριθμους μηχανικής μάθησης και με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της τιμής μιας αντικειμενικής συνάρτησης δημιουργούν σχέσεις που περιγράφουν τις αλληλεπιδράσεις δεδομένων εισόδου και εξόδου. Έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν πολύ καλή προσαρμογή στα δεδομένα που εκπαιδεύονται και στο διάστημα τιμών αυτό παρέχουν ικανοποιητική προβλεπτική ικανότητα. Παρόλα αυτά, η προεκβολή των μεταβλητών εισόδου στο μοντέλο εκτός του διαστήματος αυτού συχνά δεν παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Τεχνικές μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν Linear regression, SVR και Deep Learning αλγόριθμοι όπως νευρωνικά δίκτυα και ELM αλλά και συνδυαστικές μεθόδους μείωσης της υπολογιστικής πολυπλοκότητας όπως προσέγγιση θεωρητικών μοντέλων υψηλού βαθμού λεπτομέρειας με νευρωνικά μοντέλα ώστε να είναι κατάλληλα για εφαρμογές αυτόματης ρύθμισης. Έχουν ιδιαίτερα καλή προβλεπτική ικανότητα και απόδοση στη ρύθμιση της διεργασίας. Παρόλα αυτά, τα black box models δεν προσφέρουν εικόνα της κατανομής διαμέτρου σωματιδίων του προϊόντος. Ο πειραματικός προσδιορισμός της κατανομής αυτής απαιτεί συλλογή και κοσκίνισμα δείγματος του προϊόντος και αυτό δεν μπορεί να συμβαίνει με την ίδια συχνότητα που λαμβάνουμε μετρήσεις λειτουργίας. Για τον ίδιο λόγο, δεν μπορούν να υπάρξουν αρκετά δεδομένα για την κατανομή των διαμέτρων των σωματιδίων κατά μήκος του μύλου, ώστε να μπορεί ένα data based μοντέλο να εκπαιδευτεί σε αυτά. Η κατανομή των διαμέτρων των σωματιδίων του προϊόντος είναι ιδιαίτερα σημαντική προδιαγραφή για

την ποιότητα του τσιμέντου καθώς η αντοχή, η ρευστότητα και το setting time του καθορίζονται από αυτήν. Επίσης δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα τέτοιο μοντέλο για σχεδιαστικές αποφάσεις.

3.3. Προκλήσεις που καλείται να λύσει το προτεινόμενο μέθοδος:

Είναι αναγκαία η ανάλυση της αξονικής μεταβλητότητας της κατανομής των διαμέτρων των σωματιδίων μια μέτρηση που δεν είναι εφικτή από data based μοντέλα και δεν είναι αξιόπιστη από αμιγώς αναλυτικά μοντέλα. Η εφαρμογή της μεθόδου μας θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί κατάλληλα το πλήθος των δεδομένων που μας είναι διαθέσιμα. Είναι κρίσιμο να πετύχουμε καλύτερη συμπεριφορά των Breakage – Selection function μοντέλων χωρίς περαιτέρω διακριτοποίηση των διαστημάτων ή τη μελέτη άλλων χωρικών μεταβλητών. Σκοπός μας είναι να διατηρήσουμε το υπολογιστικό κόστος του μοντέλου χαμηλό ούτως ώστε να είναι κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Αν η ακρίβεια του προτύπου είναι ικανοποιητική θα έχουμε τη δυνατότητα αντιστροφής των υπολογιζόμενων μεγεθών της ειδικής καταναλισκόμενης ενέργειας και ειδικής επιφάνειας ώστε να χρησιμοποιηθούν ως προδιαγραφές – είσοδοι για να αξιοποιήσουμε το μοντέλο για λήψη αποφάσεων σχετικά με τις συνθήκες λειτουργίας του μύλου.

3.4. Γενική παρουσίαση μεθοδολογίας:

Στην προκειμένη έρευνα θα επιχειρήσουμε την ανάπτυξη ενός embedded μοντέλου προσαρμοσμένο σε έναν συνδυασμό πειραματικών δεδομένων και δεδομένων προσομοιώσεων (in silico) που έχει ως βάση φυσικές εξισώσεις ροής στερεών σωματιδίων καθώς και εξισώσεις μετατροπής βασισμένες σε θεωρία θραύσης. Το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που θα προκύψει επιλύεται με έναν συνδυασμό αλγορίθμων Runge Kutta και Sparse approximation, η διακριτοποίηση του του άξονα του μήκους γίνεται με τη μέθοδο 2nd order Centered finite difference.

Στο αναδυόμενο μοντέλο θα γίνει παλινδρόμηση των παραμέτρων σε κάθε πειραματικό σημείο, ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση που είναι η απόκλιση της πραγματικής από την υπολογιζόμενη τιμή ειδικής επιφάνειας του προϊόντος. Με τη μέθοδο αυτή λαμβάνουμε τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων για το εκάστοτε σημείο.

Στη συνέχεια τροφοδοτούμε τα μεταβλητές εισόδου και τις αντίστοιχες παραμέτρους σε feedforward νευρωνικό δίκτυο απ' όπου και εξάγουμε τις μεταξύ τους συσχετίσεις. Οι συναρτήσεις των παραμέτρων που θα προκύψουν αντικαθιστούν τις σταθερές παραμέτρους στο μοντέλο και το τελικό embedded μοντέλο επαληθεύεται ως προς την ακρίβειά του σε παρεμβολή και σε προεκβολή των συνθηκών λειτουργίας των δεδομένων στα οποία προσαρμόστηκε. Η προβλεπτική ικανότητα του υβριδικού μοντέλου συγκρίνεται με το φυσικό μοντέλο με σταθερές παραμέτρους, και με αμιγώς data based μοντέλα που εκπαιδεύονται σε διαφορετικά πλήθη δεδομένων. Τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για να μπορέσουμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τις μεθόδους που παρέχουν την καλύτερη αξιοποίηση μικρών και μεγάλων dataset για την χρήση που τα επιθυμούμε.

Κεφάλαιο 4. Υλοποίηση και Αποτελέσματα

4.1. Βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων Δεδομένων:

Οι μετρήσεις που έχουμε διαθέσιμες έχουν παρθεί από κάθε ώρα λειτουργίας του μύλου σε βάθος χρόνου όλου του έτους 2020. Περιλαμβάνονται σε αυτά λοιπόν και διαστήματα ωρών όπου έχει γίνει παύση και επανεκκίνηση της λειτουργίας του μύλου. Συνεπώς οποιαδήποτε διαστήματα περιλαμβάνουν downtime, δηλαδή ο χρόνος λειτουργίας του μύλου είναι μικρότερος του 0.99 όπου η μονάδα σημαίνει την αδιάκοπη λειτουργία απορρίπτεται από τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν. Η πληθώρα των διαθέσιμων δεδομένων μας επιτρέπει ελευθερία στις συνθήκες που πρέπει να πληρούνται για να θεωρήσουμε μια μέτρηση αποδεκτή. Ακόμα ακολουθούνται συνήθεις μέθοδοι φιλτραρίσματος δεδομένων, όπου απορρίπτονται ακραίες τιμές και ίδια data points. Ως inputs θα χρησιμοποιήσουμε το dry feed rate, την % περιεκτικότητα του dry feed σε clinker, ποζολάνη, γύψο, ασβεστόλιθο και ιπτάμενη τέφρα και την ταχύτητα περιστροφής του διαχωριστή ενώ ως output θα χρησιμοποιηθεί μόνο η μέτρηση Blaine της ειδικής επιφάνειας του προϊόντος.

Τα δεδομένα που μας παρέχονται είναι ημι-μόνιμης κατάστασης με την έννοια ότι οι μετρήσεις παίρνονται ανά μία ώρα και δεδομένου ότι μόνιμη κατάσταση στον μύλο επιτυγχάνεται σε περίπου 30 λεπτά και ότι οι μεταβολές στις εισόδους είναι μικρές. Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τη διασπορά των διαμέτρων για διαφορετικές εισόδους. Υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις ειδικής επιφάνειας (Blaine).

Τα δεδομένα που έχουμε διαθέσιμα περιλαμβάνουν τα εξής μεγέθη:

α/α	Όνομα χαρακτηριστικού στα πρωτογενή αρχεία (xls)	Περιγραφή χαρακτηριστικού	Μονάδα Μέτρησης
1	(χωρίς όνομα)	Η ημερομηνία και η ώρα της ημέρας που αφορούν τα δεδομένα της εκάστοτε εγγραφής. Μοναδικό αναγνωριστικό (identifier).	-
2	Mill Running Time	Ο χρόνος λειτουργίας του μύλου άλεσης σε μια ώρα.	Hours (hr)
3	Cement Type	Τύπος μείγματος.	-
4	Total Feed (wet)	Η συνολική ποσότητα πρώτων υλών που μπήκαν στον μύλο άλεσης σε μια ώρα. (wet)	Tn/hr
5	Total Feed (dry)	Η συνολική ποσότητα πρώτων υλών που μπήκαν στον μύλο άλεσης σε μια ώρα. (dry)	Tn/hr
6	Clinker Feed Ratio	Το ποσοστό του κλίνκερ στο μείγμα άλεσης.	Επί τοις εκατό (%)
7	Pozzolan Feed Ratio	Το ποσοστό της ποζολάνης στο μείγμα άλεσης.	Επί τοις εκατό (%)
8	Gypsum Feed Ratio	Το ποσοστό της γύψου στο μείγμα άλεσης.	Επί τοις εκατό (%)

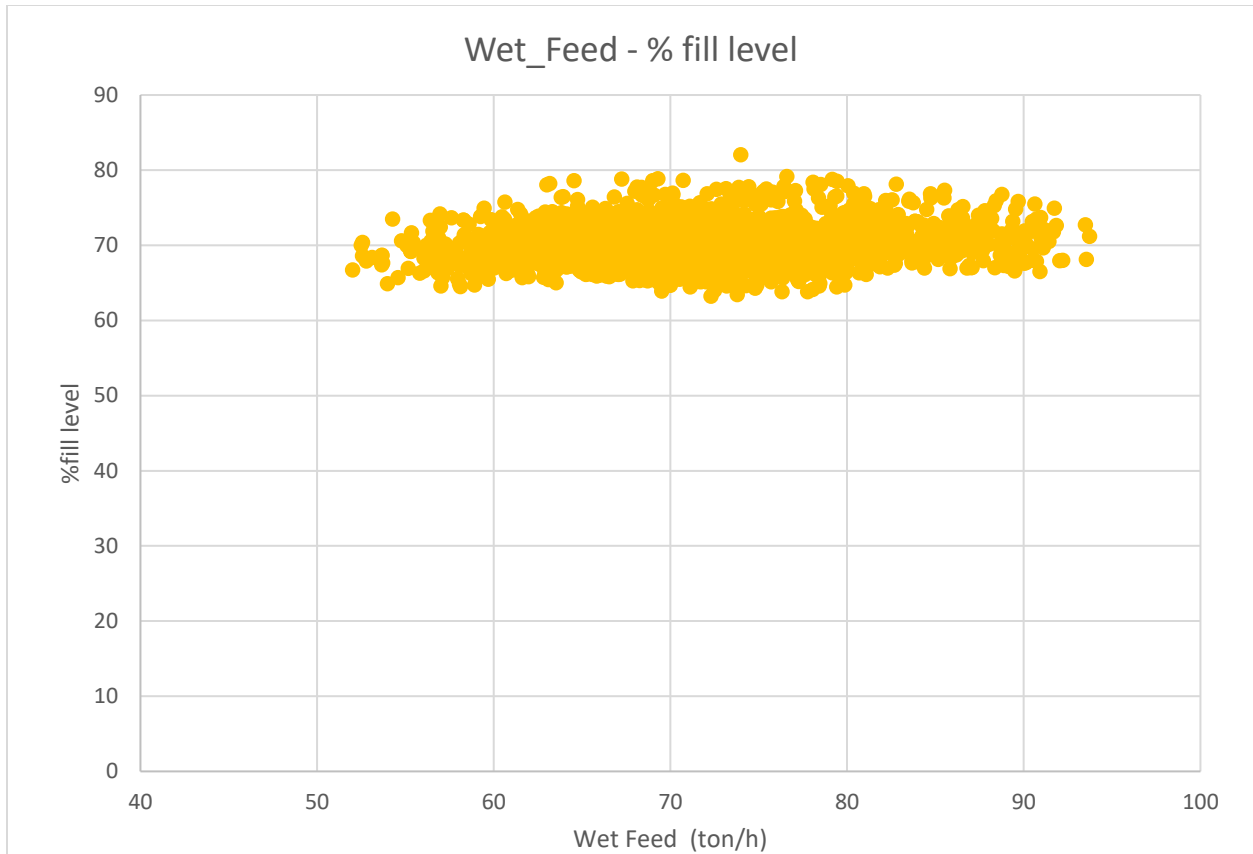
α/α	Όνομα χαρακτηριστικού στα πρωτογενή αρχεία (xls)	Περιγραφή χαρακτηριστικού	Μονάδα Μέτρησης
9	D Mat Feed Ratio	Το ποσοστό του ασβεστόλιθου στο μείγμα άλεσης.	Επί τοις εκατό (%)
10	Fly Ash Feed Ratio	Το ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας στο μείγμα άλεσης.	Επί τοις εκατό (%)
11	GRACE Feed	Ροή βελτιωτικού GRACE.	ml/min
12	TEA Feed	Ροή βελτιωτικού TEA	ml/min
13	TIPA Feed	Ροή βελτιωτικού TIPA.	ml/min
14	7H2OFeSO4 Feed	Ροή τροφοδότησης με θειικό υποσίδηρο.	kgr/hr
15	Separator Speed	Ταχύτητα περιστροφής του διαχωριστή.	rpm
16	Separ. Fan Motor Load	Ένταση του ανεμιστήρα που δίνει ροή αέρα στο διαχωριστή, ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του ανεμιστήρα.	Επί τοις εκατό (%)
17	Elev. Load (Calc.)	Ένταση λειτουργίας του αναβατόριου που δουλεύει το αναβάτοριο, ως ποσοστό της μέγιστης λειτουργίας του	Επί τοις εκατό (%)

α/α	Όνομα χαρακτηριστικού στα πρωτογενή αρχεία (xls)	Περιγραφή χαρακτηριστικού	Μονάδα Μέτρησης
18	Folafon (Calc.)	Εκτίμηση πληρότητας του μύλου άλεσης, με χρήση «ηλεκτρονικού αυτιού».	Επί τοις εκατό (%)
19	E/F Fan Damper	Ένταση του ανεμιστήρα στο ηλεκτρόφιλτρο, ως ποσοστό της πλήρους λειτουργίας.	Επί τοις εκατό (%)
20	Inlet Subpressure	Υποπίεση αέρα στην είσοδο του μύλου άλεσης.	mmH2O
21	Outlet Subpressure	Υποπίεση αέρα στην έξοδο του μύλου άλεσης.	mmH2O
22	Mill Motor Load	Κατανάλωση ενέργειας από τον κινητήρα του μύλου άλεσης.	kW
23	Specific Consumption	Κατανάλωση ενέργειας στον μύλο άλεσης, ανά τόνο παραγόμενου προϊόντος.	kWh/t
24	Specific Consumption for 3800 Blaine	Κατανάλωση ενέργειας στον μύλο άλεσης, ανά τόνο παραγόμενου προϊόντος, με αναγωγή σε συγκεκριμένο Blaine.	kWh/t

α/α	Όνομα χαρακτηριστικού στα πρωτογενή αρχεία (xls)	Περιγραφή χαρακτηριστικού	Μονάδα Μέτρησης
25	Mill Inlet Temp.	Θερμοκρασία (αέρα) στην είσοδο του μύλου άλεσης.	Βαθμοί Κελσίου (°C)
26	Mill Outlet Temp.	Θερμοκρασία (αέρα) στην έξοδο του μύλου άλεσης.	Βαθμοί Κελσίου (°C)
27	E/F Outlet Temp.	Θερμοκρασία (αέρα) του μύλου στο ηλεκτρόφιλτρο.	Βαθμοί Κελσίου (°C)
28	Cement Storage Temp.	Θερμοκρασία (αέρα) στο χώρο αποθήκευσης.	Βαθμοί Κελσίου (°C)
29	Mill Inlet Water Injection	Ψεκασμός νερού στην είσοδο του μύλου άλεσης.	lt/min
30	Mill Outlet Water Injection	Ψεκασμός νερού στην έξοδο του μύλου άλεσης.	lt/min
31	Blaine Target	Το επιδιωκόμενο Blaine του μείγματος.	cm ² /gr
32	Blaine	Το μετρούμενο Blaine του μείγματος.	cm ² /gr

α/α	Όνομα χαρακτηριστικού στα πρωτογενή αρχεία (xls)	Περιγραφή χαρακτηριστικού	Μονάδα Μέτρησης
33	Fineness		Επί τοις εκατό (%)

Θα προσομοιώσουμε τη λειτουργία του μύλου με επιλεγμένες μεταβλητές που θεωρούμε πως είναι ανεξάρτητες των υπολοίπων και πως έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη λεπτότητα του τελικού προϊόντος. Αυτές είναι η μαζική τροφοδοσία Dry_Feed, οι συστάσεις Clinker_pct, Pozzolan Feed_pct, Gypsum_pct, Limestone_pct, Fly Ash_pct και η ταχύτητα περιστροφής του διαχωριστή. Το υπολογιζόμενο μέγεθος και μέτρο σύγκλισης θα είναι το Blaine. Θα ήταν χρήσιμη μια δεύτερη έξοδος με την οποία θα επαληθευόταν η σύγκλιση του μοντέλου μας και τον ρόλο αυτό θα μπορούσε να τον παίξει η μεταβλητή Fofafon_pct, δηλαδή ένα μέτρο της πληρότητας του μύλου. Ωστόσο οι μετρήσεις αυτής της μεταβλητής είναι αναξιόπιστες λόγω του ότι βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρονικού «αυτιού» και το γεγονός ότι δίπλα στον εξεταζόμενο μύλο υπάρχει και ένας δεύτερος μύλος επιδρά στις μετρήσεις καθιστώντας τες ανακριβείς για τις ανάγκες της δικής μας ανάλυσης. Ακόμη, και ακριβέστερες να ήταν οι μετρήσεις του, η πληρότητα του μύλου είναι μια μεταβλητή που εμφανίζει μεγάλη συνάφεια με αυτή της μαζικής τροφοδοσίας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, οπότε κρίνεται μη αναγκαία η σπατάλη υπολογιστικών πόρων για να συμπεριλάβουμε και αυτή σαν είσοδο.



Σχήμα 3:Γραφική αναπαράσταση της πληρότητας του μύλου συναρτήσει μόνο της συνολικής παροχής.

Ο θόρυβος που παρατηρούμε στο % fill level οφείλεται σε κάποιο βαθμό στην αλληλεπίδραση του οργάνου με τον διπλανό μύλο.

4.2. Αναλυτικό Μοντέλο:

4.2.1. Μοντέλο Μύλου:

Παραδοχές μοντέλου:

Η μέτρηση του Blaine δεν είναι ισοδύναμο, αλλά ανάλογο μέγεθος της ειδικής επιφάνειας. Συνεπώς η εξίσωση υπολογισμού του θα είναι η εξής:

$$Blaine = c * \frac{\sum_{i=1}^{10} (w_i * \frac{6}{d_i})}{\sum_{m=1}^5 (content(m) * \rho(m))}$$

Principal Component Analysis (PCA) σε πραγματικά δεδομένα έχει δείξει μικρή επιρροή της μεταβλητής της ταχύτητας του αέρα στο τελικό Blaine. [1]

Γραμμική εξάρτηση Ισχύος μοτέρ με την πληρότητα του μύλου.

Γραμμική εξάρτηση της παραμέτρου c_2 με την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε σκληρά προς μαλακά υλικά.

Τα σωματίδια θεωρούνται σφαίρες.

Η ψαθυρότητα του υλικού επηρεάζει την κατανομή των διαμέτρων των παραγόμενων σωματιδίων αλλά όχι τον ειδικό ρυθμό θραύσης του.

Η σχάρα στο τέλος του πρώτου διαμερίσματος, όπως και η σχάρα στην έξοδο του μύλου δεν συγκρατεί σωματίδια αλλά μόνο τις μεταλλικές σφαίρες.

Η ανάλυσή μας θα περιοριστεί στην εξέταση των διεργασιών ως προς την αξονική μεταβλητή. Στόχος του μοντέλου είναι η πρόβλεψη της πορείας της κατανομής των διαμέτρων των σωματιδίων κατά μήκος του μύλου οπότε η μελέτη της ακτινικής συνιστώσας θα ήταν ανούσια αν όχι υπολογιστικά επιβαρυντική προς το μοντέλο.

Αναπτύσσουμε μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία του σφαιρόμυλου ως εξής:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -v_i * \frac{\partial u_i}{\partial z} + D_i * \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} + \sum_{j=1}^n b_{ij} * s_j * f(u_j)$$

$-v_i * \frac{\partial u_i}{\partial z}$ Ο όρος αυτός περιγράφει την αξονική ροή του τσιμέντου κατά μήκος του μύλου.

$D_i * \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2}$ Ο όρος αυτός περιγράφει την αξονική διάχυση του τσιμέντου από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλότερης.

$\sum_{j=1}^n b_{ij} * s_j * f(u_j)$ Ο όρος αυτός περιγράφει το σύνολο των μετατροπών που συμβαίνουν μεταξύ των σωματιδίων διαφορετικών διαστημάτων διαμέτρων μέσω θραύσης.

$\frac{\partial u_i}{\partial t}$ Όρος μεταβατικής κατάστασης.

Όπου i ο αριθμός των διαστημάτων διαμέτρων των σωματιδίων στα οποία έχουμε χωρίσει το υλικό μέσο μας.

u η γραμμική πυκνότητα του τσιμέντου tons/m

z η αξονική μεταβλητή, κατά μήκος του μύλου.

D συντελεστής διάχυσης σωματιδίων τσιμέντου κατά Fick

b Breakage function

s Selection function

Στην εφαρμογή μας για λόγους οικονομίας υπολογιστικών απαιτήσεων θα διαλέξουμε να χωρίσουμε τα σωματίδια του υλικού μέσου σε 10 διαστήματα διαμέτρων τα οποία θα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα coarse medium fine και fine σωματιδίων. Ο περαιτέρω διαχωρισμός σε επιμέρους διαστήματα διαμέτρων θα προσέγγιζε περισσότερο την πραγματικότητα αλλά για κάθε ένα διάστημα που προσθέτουμε το σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων μας μεγαλώνει κατά δύο διαστάσεις και το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται δυσανάλογα. Ακόμα, αυξάνονται οι απαραίτητες για υπολογισμό παράμετροι όπως η αξονική ταχύτητα και ο συντελεστής διάχυσης του κάθε διαστήματος διαμέτρου σωματιδίων. Επίσης, βάσει των δεδομένων που μας είναι διαθέσιμα, η επίλυση του μεταβατικού προβλήματος είναι ανούσια και ανέφικτη λόγω του ότι τα δεδομένα είναι παρμένα σε αραιά χρονικά διαστήματα, οπότε για τις δικές μας αναλύσεις και βάσει της μικρής χρονικής σταθεράς του μύλου, το κύκλωμα λειτουργεί σε ημιμόνιμη κατάσταση.

Ο όρος της μεταβατικής κατάστασης οπότε μηδενίζεται:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0$$

Συνοριακές Συνθήκες:

Είσοδος στον μύλο (1^ο διαμέρισμα):

$$D_i * \frac{\partial u_i}{\partial z} \Big|_{z=0} - v_i * u_i(z=0) = -q_f * w_{fi} - q_r * w_{r,i}$$

Έξοδος από το 1^ο διαμέρισμα:

$$\frac{\partial u_i}{\partial z}_{z=L_1} = 0$$

Είσοδος στο 2^ο διαμέρισμα:

$$D_i * \frac{\partial u_i}{\partial z}_{z=0} - v_i * u_i(z=0) = -u_i(z=L_1) * v_i$$

Έξοδος από το 2^ο διαμέρισμα:

$$\frac{\partial u_i}{\partial z}_{z=L_2} = 0$$

Ο μύλος περιλαμβάνει 2 διαμερίσματα (compartments) μέσα στα οποία περιέχονται διαφορετικών διαμέτρων μέσα (μεταλλικές σφαίρες) και συμβαίνουν διαφορετικά σύνολα μετατροπών. Στο πρώτο διαμέρισμα γίνεται η θραύση των μεγάλων σωματιδίων (>1mm), ενώ στο δεύτερο των μικρότερων. Τα διαμερίσματα χωρίζονται από μια σχάρα της οποίας ο σκοπός είναι να συγκρατεί τις μεταλλικές σφαίρες των διαμερισμάτων στα αντίστοιχα διαμερίσματα. Για τον λόγο αυτό στο πρώτο διαμέρισμα χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες μεταλλικές σφαίρες διαμέτρου από 40-90 mm ενώ στο δεύτερο 15-30 mm. Η επικρατέστερη μορφή θραύσης που εξετάζεται στους σφαιρόμυλους συμβαίνει με τα σωματίδια του τσιμέντου να παγιδεύονται ανάμεσα σε 2 μεταλλικές σφαίρες που συγκρούονται. Είναι σημαντικό λοιπόν ούτως ώστε να είναι σημαντικές σε αριθμό οι αποτελεσματικές αυτές κρούσεις να υπάρχει συγγένεια μεταξύ του συνολικού όγκου του τσιμέντου και των σφαιρών. Σε λειτουργία με

μικρό συνολικό όγκο σφαιρών ο ρυθμός μετατροπής του τσιμέντου είναι χαμηλότερος του δυνατού για δεδομένο όγκο μύλου ενώ σε μεγάλο συνολικό όγκο σφαιρών μεγάλη ενέργεια σπαταλάται σε αναποτελεσματικές κρούσεις μεταξύ μεταλλικών σφαιρών. Ένας τυπικός σφαιρόμυλος λειτουργεί σε ποσοστό κάλυψης 30-35% του φαινόμενου όγκου του μύλου. Το ποσοστό κάλυψης του μύλου σε τσιμέντο εν γένει είναι σε αντίστοιχο ποσοστό. Γνώμονας ακόμη για το ποσοστό κάλυψης του μύλου σε τσιμέντο είναι και οι ανάγκες παραγωγής και η επιθυμητή ενεργειακή απόδοση. Πειραματικά έχει βρεθεί πως σε ποσοστό 25-26% ο μύλος λειτουργεί με ελάχιστη ενεργειακή απαίτηση ανά τόνο παραγόμενου προϊόντος. Σε συνθήκες αυξημένης ζήτησης όμως ο μύλος λειτουργεί με μεγαλύτερη, με σκοπό την αύξηση της παραγωγής. Συνεπώς η προσομοίωση του μύλου θα περιλαμβάνει 2 παρόμοια μοντέλα μύλου και κατά συνέπεια το σύστημα που θα λυθεί, καθώς τα δύο μοντέλα μοιράζονται κοινές μεταβλητές, θα είναι στην πραγματικότητα 20x20.

Οι κινητικές της θραύσης που χρησιμοποιούμε είναι οι εξής τρεις και χωρίζονται στις αντίστροφες εκθετικές:

$$1. f(u_j) = a_j * u_j * e^{-\beta * H}$$

Περιγράφει τη μείωση του ρυθμού με την αύξηση του holdup. Παίρνει ακραίες, μη ρεαλιστικές τιμές για πολύ χαμηλό holdup.

$$2. f(u_j) = a_j * u_j * e^{\frac{-\beta * u_n}{H}}$$

Παραλλαγή της πρώτης. Παίρνει υπόψιν τη συσσώρευση των fine σωματιδίων και περιγράφει τη μείωση του ρυθμού λόγω της απορρόφησης της ενέργειας των κρούσεων από το στρώμα fine σωματιδίων που δημιουργείται.

Και τη γραμμική:

$$3. f(u_j) = a_j * \frac{u_j}{H} + c$$

Καλύτερη συμπεριφορά σε χαμηλό holdup.

Δεδομένου ότι το holdup στα δεδομένα που έχουμε παίρνει τιμές μεταξύ 65% και 80%, η συμπεριφορά του μύλου σε ακραίες τιμές holdup δεν θα είναι πρόβλημα οπότε θα μας περιορίσει στην επιλογή της κινητικής.

Επιλέγεται λοιπόν η κινητική 1. που παρουσιάζει πιο ρεαλιστική περιγραφή της απενεργοποίησης των κρούσεων συναρτήσει της πληρότητας.

Υπολογίζουμε σε κάθε χρονική στιγμή την ηλεκτρική κατανάλωση του μύλου ως συνάρτηση του holdup. Η απαιτούμενη ισχύς για την περιστροφή του μύλου είναι ανάλογη του βάρους που καλείται να περιστρέψει το μοτέρ επί της ταχύτητας περιστροφής.

$$P(t) = \omega * (f * (\sum_{i=1}^n \left(\int_0^L u_i(t) * dz \right) + BallMillCharge) + deadWeight)$$

Το σύστημα άλεσης που μελετάμε είναι τύπου κλειστού κυκλώματος, δηλαδή η έξοδος του σφαιρόμυλου είναι συνδεδεμένη με αναβατήριο και διαχωριστή από τον οποίο τα μεγαλύτερα σωματίδια επιστρέφουν στην τροφοδοσία του μύλου.

Το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε είναι ένα 20x20 σύστημα διαφορικών εξισώσεων μιας (αξονικής) μεταβλητής. Για την επίλυσή του θα χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό gPROMS model

builder. Πρόκειται για περιβάλλον μαθηματικής προτυποποίησης διεργασιών της Siemens.

Μεταφέρουμε τις εξισώσεις και διακριτοποιούμε το μήκος κάθε διαμερίσματος του μύλου για το οποίο το πρόγραμμα θα λύσει το σύστημα με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Ορίζουμε τις μεταβλητές του προβλήματος με τις μονάδες μέτρησης τους και τα όρια στα οποία οι τιμές περιορίζονται. Ορίζουμε τις παραμέτρους του προβλήματος και τους προσδίδουμε τιμές.

Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε για training και validation του μοντέλου μας παρέχονται από το εργοστάσιο Καμαρίου του TITAN A.E. και αντιστοιχούν σε έναν χρόνο λειτουργίας 4 μύλων, εκ των οποίων οι 3 είναι οριζόντιοι σφαιρόμυλοι, ο ένας με πρέσα για προ-θραύση και ένας Κατακόρυφος Roller Mill. Οι μετρήσεις γίνονται μια φορά ανά ώρα και εμείς θα χρησιμοποιήσουμε από τα δοσμένα τα εξής:

Όνομα μεταβλητής	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
Dry_Feed	Tonnes/h	Μαζική Ροή Ξηρής Τροφοδοσίας
Clinker_pct	% w/w	Περιεκτικότητα σε Clinker
Pozzolan_pct	% w/w	Περιεκτικότητα σε Ποζολάνη
Gypsum_pct	% w/w	Περιεκτικότητα σε Γύψο
Limestone_pct	% w/w	Περιεκτικότητα σε Ασβεστόλιθο

Flying_ash_pct	% w/w	Περιεκτικότητα σε Ιπτάμενη Τέφρα
Separator_spd	rpm	Ταχύτητα Περιστροφής Διαχωριστή

Breakage function:

Κατά τη θραύση ενός στερεού σωματιδίου παράγονται περισσότερα σωματίδια μικρότερης διαμέτρου. Η σχέση που δίνει την κατανομή των διαμέτρων των σωματιδίων που παράγονται από τη θραύση ενός σωματιδίου δεν είναι γνωστή και εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί σχέσεις που για αρκετά μεγάλο αριθμό θραύσεων προσεγγίζουν την κατανομή αυτή. Για τις ανάγκες τέτοιων εφαρμογών θεωρούμε ότι οι παράμετροι των παρακάτω εξισώσεων είναι material specific και σχετίζονται με ιδιότητες όπως η ψαθυρότητα. Σε κάθε περίπτωση, οι παράμετροι αυτές θα προσαρμοστούν στα πειραματικά δεδομένα μας.

Έχουν προταθεί εξισώσεις:

$$B(d_i) = 1 - (1 - r_i)^{n_1} (1 - r_i^2)^{n_2} (1 - r_i^3)^{n_3} \quad \text{Klimpel and Austin}$$

$$B(d_i) = \frac{1 - e^{-1}}{1 - e^{-1}} = 1.58(1 - e^{-r_i}) \quad \text{Broadbent and Callcott}$$

Η εξίσωση που έχει προταθεί από τους Broadbent και Callcott προορίζεται για απλούστερες εφαρμογές καθώς είναι ανεξάρτητη του υλικού.

Για τις ανάγκες αυτής της μελέτης θα χρησιμοποιηθεί μια αποκομμένη εκδοχή της εξίσωσης Klimpel and Austin ούτως ώστε να μην αυξήσουμε τον αριθμό των άγνωστων παραμέτρων.

$$B(d_i) = 1 - (1 - r_i)^{c_3}$$

Είναι παραδοχή του μοντέλου μας πως η σταθερά c_3 εξαρτάται μόνο από το υλικό του σωματιδίου.

Θεωρώντας το τσιμέντο σαν μείγμα διάφορων υλικών και για μεγάλο αριθμό θραύσεων μπορούμε να βρούμε μια τιμή της σταθεράς που θα αντιστοιχεί σε μείγμα συγκεκριμένης σύστασης. Συγκεκριμένα η ιδιότητα των υλικών που μας ενδιαφέρει σε αυτήν την περίπτωση είναι η τάση τους να θρυμματίζονται. Επειδή δεν έχουμε άμεσο μέτρο αυτής της ιδιότητας για κανένα από τα 5 συστατικά του τσιμέντου που μελετάμε θα χρησιμοποιήσουμε έμμεσα μια ιδιότητα που μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε για κάθε συστατικό:

$$c_3 = c_1 * m + c_4$$

Σκληρότητες υλικών:

Υλικό	Σκληρότητα σε κλίμακα Moh
Clinker	6 [2]
Ασβεστόλιθος	3-4
Ποζολάνη	5.5
Γύψος	2
Ιπτάμενη Τέφρα	-

Η ιπτάμενη τέφρα στην πραγματικότητα είναι, ανάλογα και με τη σύστασή της, μεγάλης σκληρότητας υλικό. Παρόλα αυτά, επειδή συνήθως τροφοδοτείται σε λεπτή κοκκομετρία, δεν δυσκολεύει τη θραύση όπως τα υπόλοιπα σκληρά συστατικά της λίστας.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να τριχοτομήσουμε τα υλικά στις εξής κατηγορίες:

Σκληρά υλικά: Clinker, Ποζολάνη

Μαλακά υλικά: Γύψος, ασβεστόλιθος

Υλικά που δεν επηρεάζουν: Ιπτάμενη Τέφρα

Θα χρησιμοποιήσουμε λοιπόν σαν μέτρο της αντίστασης στη θραύση μιας δεδομένης τροφοδοσίας τον λόγο των μαλακών προς σκληρών υλικών σταθμισμένα προς τη σκληρότητά τους.

$$m = \frac{6 * Clinker + 5.5 * Pozolane}{2 * Gypsum + 3.5 * Limestone}$$

Η πιθανότητα ενός σωματιδίου διαμέτρου d_i να προκύψει από την θραύση ενός σωματιδίου

$$b_i(d_i) = B_i(d_i) - B_{i+1}(d_i)$$

Καταλήγει σε κάτω τριγωνικό πίνακα:

$$b_{i,j} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{2,1} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{3,1} & b_{3,2} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{4,1} & b_{4,2} & b_{4,3} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{5,1} & b_{5,2} & b_{5,3} & b_{5,4} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{6,1} & b_{6,2} & b_{6,3} & b_{6,4} & b_{6,5} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{7,1} & b_{7,2} & b_{7,3} & b_{7,4} & b_{7,5} & b_{7,6} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{8,1} & b_{8,2} & b_{8,3} & b_{8,4} & b_{8,5} & b_{8,6} & b_{8,7} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ b_{9,1} & b_{9,2} & b_{9,3} & b_{9,4} & b_{9,5} & b_{9,6} & b_{9,7} & b_{9,8} & -1 & 0 & 0 \\ b_{10,1} & b_{10,2} & b_{10,3} & b_{10,4} & b_{10,5} & b_{10,6} & b_{10,7} & b_{10,8} & b_{10,9} & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Είναι σημαντικό, για να διατηρηθεί η ιδιότητα της φυσικής αντιστοιχίας του θεωρητικού μοντέλου, οι παράμετροι που θα προσαρμοστούν στα δεδομένα να μην είναι πολλές στο πλήθος. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να προσδώσει μεγαλύτερη ικανότητα προσαρμογής ακριβώς λόγω των περισσότερων βαθμών ελευθερίας αλλά καθιστά το τελικό σύστημα υπερ-προσαρμοσμένο (overfitted). Για να περιορίσουμε τις προσαρμόσιμες παραμέτρους θα ορίσουμε τον λόγο των σκληρών προς μαλακών συστατικών και βάσει αυτών θα ορίσουμε την παράμετρο α της θραύσης των υλικών.

Selection function:

Είναι η σχέση που ορίζει τον ειδικό ρυθμό θραύσης σωματιδίων ανάλογα του υλικού και της διαμέτρου αυτών.

$$s_i = a_i * d_i^a * f(u)$$

$$f(u) = u(z)_i * e^{-c_n * H(z)}$$

Στο πρώτο διαμέρισμα οι μεταλλικές σφαίρες είναι μεγαλύτερης διαμέτρου και στοχεύουν στη θραύση των χοντρών σωματιδίων, με διάμετρο μεγαλύτερης των 500 μm. Αντίστοιχα στο δεύτερο διαμέρισμα οι σφαίρες είναι μικρές και στοχεύουν στη θραύση των μικρότερων σωματιδίων. Με αυτά υπόψιν, ορίζονται διαφορετικές παράμετροι a όπου ονομάζονται a_{coarse} και a για το πρώτο και δεύτερο διαμέρισμα αντίστοιχα.

Στο πρώτο διαμέρισμα, τα σωματίδια διαμέτρου 5000 και 500 μm θα ακολουθούν την εξίσωση

$$s_i = a_{coarse} * d_i^{a_{coarse}} * f(u)$$

Ενώ τα υπόλοιπα με μικρότερη διάμετρο ακολουθούν την εξίσωση:

$$s_i = \frac{a_{coarse}}{4} * d_i^{\frac{a_{coarse}}{4}} * f(u)$$

Στο δεύτερο διαμέρισμα όλα τα σωματίδια ακολουθούν την εξίσωση:

$$s_i = a_i * d_i^a * f(u)$$

4.2.2. Μοντέλο Διαχωριστή:

Η διεργασία του είναι πολύ γρηγορότερη από αυτή της άλεσης στο μύλο. Γι' αυτό θεωρούμε τη λειτουργία του σταθερά σε μόνιμη κατάσταση. Η % επιστροφή των διαχωριστών τέτοιου τύπου έχουν μια χαρακτηριστική καμπύλη που θυμίζει αγκίστρι «fishhook – reduced efficiency curve». Θα προσεγγίσουμε τη συμπεριφορά του διαχωριστή μέχρι και τα 96 μm καθώς από τη διάμετρο αυτή και πάνω ο διαχωριστής επιστρέφει πρακτικά όλο το φορτίο. Η προσέγγιση μας ενδιαφέρει να ακολουθεί όσο το δυνατόν πιο πιστά τα πειραματικά σημεία και δεν υπάρχει ανάγκη για προεκβολή πέρα από αυτά καθώς η προσομοίωση γίνεται μεταξύ διαμέτρων για τα οποία έχουμε πειραματικές τιμές. Προσεγγίζουμε την κυρτή καμπύλη με τρεις πολυωνυμικές εξισώσεις. Το μοντέλο που διαλέγουμε να περιγράψει τη λειτουργία του θα είναι απλό γραμμικό:

$$q_r * w_{r,i} = \varepsilon(x_i) * u_i$$

Έτσι λοιπόν το ρεύμα q_r επιστρέφει σαν ανακυκλοφορία και ενώνεται με το ρεύμα τροφοδοσίας του μύλου.

Η επιστροφή του διαχωριστή είναι συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση θα μοντελοποιήσουμε τη λειτουργία του με μια κυρτή καμπύλη που μετατοπίζεται οριζοντίως σε γραμμική συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής του.

Η σχέση που περιγράφει την εξάρτηση της επιστροφής του διαχωριστή:

$$z = x + c_1 * (v_s - v_o)$$

Οπότε ορίζουμε την επιστροφή ως

Για $0.5 \mu m \leq x \leq 2.5 \mu m$

$$\varepsilon = -61333 * z^2 + 182.82 * z + 0.3176$$

Για $2.5 \mu m < x \leq 20 \mu m$

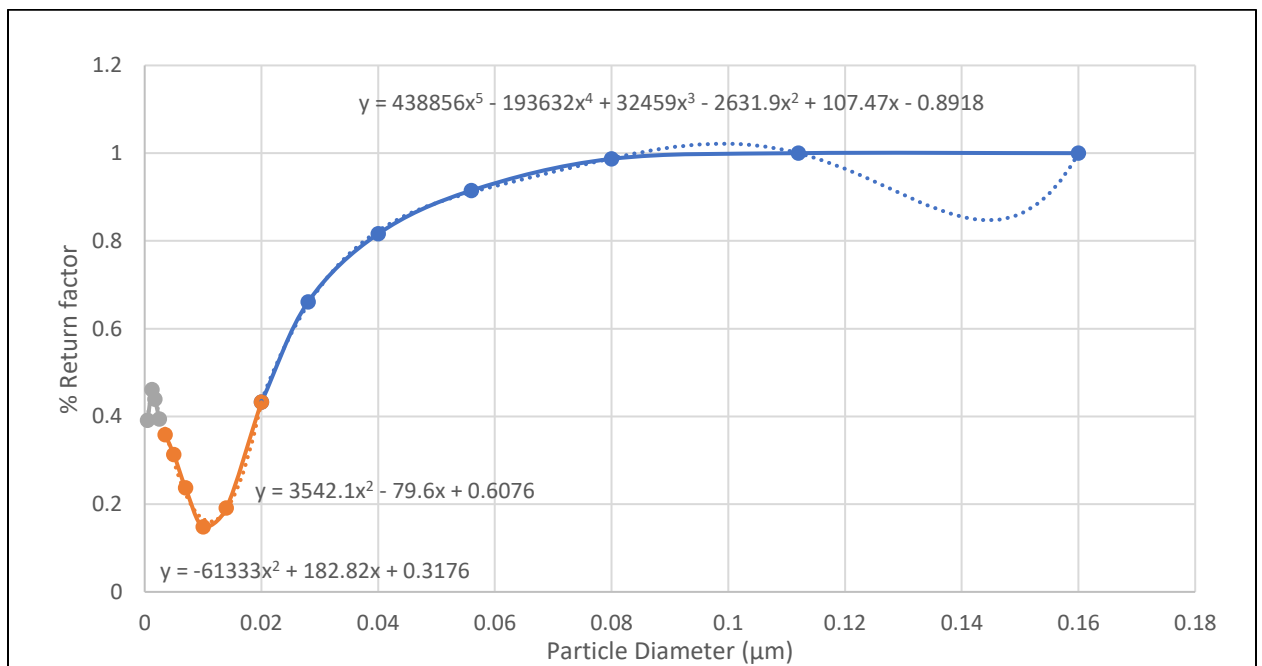
$$\varepsilon = 3542.1 * z^2 - 79.6 * z + 0.6076$$

Για $20 \mu m < x \leq 96 \mu m$

$$\varepsilon = 438856 * z^5 - 193632 * z^4 + 32459 * z^3 - 2631.9 * z^2 + 107.47 * z - 0.8918$$

$96 \mu m < z$

$$\varepsilon = 1$$



Σχήμα 4: Πολυωνυμική προσέγγιση της καμπύλης επιστροφής (Tromp Curve) του διαχωριστή.

Επαλήθευση του μοντέλου

Για το interpolation set επιλέχθηκαν τυχαία 110 σημεία πειραματικών δεδομένων και αφού ελέγχθηκαν πως δεν περιγράφουν ακραίες συνθήκες λειτουργίας αφαιρέθηκαν από το training set.

Για το extrapolation set έγινε filtering των σημείων πειραματικών δεδομένων που περιείχαν ακραίες τιμές των δύο εισόδων στις οποίες το output είναι περισσότερο ευαίσθητο, δηλαδή τη μαζική τροφοδοσία και την ταχύτητα περιστροφής του διαχωριστή. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν σετ δεδομένων που περιείχαν ταυτόχρονα μαζική ροή μικρότερη των 60 t/h ή μεγαλύτερη των 85 t/h και ταχύτητα περιστροφής του separator: μεγαλύτερη των 210 rpm ή μικρότερη των 155 rpm. Τα δεδομένα αυτά, πάλι, αφαιρέθηκαν από το training set και 135 σημεία δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν για επαλήθευση.

Δεδομένα για την κοκκομετρία στην τροφοδοσία του μύλου δεν υπήρχαν για όλα τα data points που είχαμε, ούτε για ξεχωριστές ώρες λειτουργίας. Η μέτρηση της κοκκομετρίας είναι χρονοβόρα διαδικασία. Αντ' αυτού είχαμε δεδομένα για την κοκκομετρία του clinker που αντιστοιχούσαν σε μια μέτρηση με δείγμα που αντιπροσώπευε ολόκληρη τη μέρα λειτουργίας. Με την υπόθεση εργασίας πως η αρχική κοκκομετρία της τροφοδοσίας δεν έχει μεγάλη επιρροή στην τελική τιμή της ειδικής επιφάνειας του προϊόντος. Η υπόθεση αυτή είναι βασισμένη στο γεγονός ότι τα σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερης από 500 μm έχουν ειδικό ρυθμό θραύσης τόσο υψηλό που σε μικρό μήκος μέσα στο

πρώτο διαμέρισμα του μύλου έχουν στο μεγαλύτερο μέρος τους μετατραπεί σε άλλα σωματίδια μικρότερης διαμέτρου.

ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ(kg)				
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	26/1/2020	12/2/2020	27/4/2020	11/5/2020
Καύσιμο				
ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ (mm)				
40	0.8	9.4	8.6	1.7
30	2.8	20.8	12.9	6.5
25	4.8	40.3	19.5	12.8
20	8.7	63.1	25.3	22.7
15	13.5	78.9	34.1	32
10	24.3	97.3	65.4	50.1
5	42.6	98.5	90.2	65.9
3	53.3	98.5	94.7	75.1
0.5	83.9	98.7	96.7	94.9

Έχει παρθεί ένας μέσος όρος αυτών των 4 μηνών.

Για τα υπόλοιπα "χοντρά" υλικά έχουν παρθεί αυτές οι τιμές από μετρήσεις που αντιπροσωπεύουν το σύνολο των δεδομένων που έχουμε:

Residue	Gypsum	Pozzolan	Limestone
Sieve(mm)	(%)	(%)	(%)
40	4	2.2	0
30	7.2	6.6	2.1
25	10.5	11.4	4.2
20	14.3	18	7.9
15	21	25	12.4
10	37.1	41	23.4
5	58.4	50	41.8
3	69.2	66.8	51.9
0.5	91	83.8	82.1

Ενώ για την ιπτάμενη τέφρα:

Mesh (μm)	Pass (%)
1.00	1.46
2.00	3.14
2.00	4.59
4.00	5.92
5.00	7.06
6.00	8.04
7.00	8.85
8.00	9.53
10.00	10.55
12.00	11.41
14.00	12.38
16.00	13.62
20.00	17.19
22.00	19.53
25.00	23.70
28.00	28.45
32.00	35.27
38.00	45.66
40.00	49.02
45.00	56.96
50.00	64.08
53.00	67.93
60.00	75.65
66.00	78.44
75.00	84.52
85.00	89.32
95.00	92.83
100.00	94.80
125.00	95.92

Για να ταιριάζουν οι παραπάνω διαμετρήσεις στις δέκα που έχουμε επιλέξει να μελετήσουμε εμείς έχει ληφθεί η καμπύλη cumulative passing του κάθε υλικού και λαμβάνεται η τιμή περιεκτικότητας σε κάθε διάμετρο από τη διαφορά του passing της διαμέτρου i με αυτό της $i-1$.

Η υπολογιζόμενη συνολική αρχική κοκκομετρία της τροφοδοσίας σε κάθε πειραματικό σημείο ορίζεται ως εξής:

$$w_f^i = \sum_{m=1}^5 w_{f-mat}^i(m) * content(m)$$

Όπου $content(m)$ το κλάσμα βάρους κάθε υλικού. Ενώ $w_{f-mat}^i(m)$ η περιεκτικότητα του υλικού m σε διάμετρο σωματιδίων i .

4.3. Παλινδρόμηση Μοντέλου και Παρουσίαση αποτελεσμάτων:

Η προσαρμογή των παραμέτρων του φυσικού μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα τόσο στο σύνολό τους όσο και σε συγκεκριμένα data points γίνονται στο αντίστοιχο validation module του gPROMS Model Builder. Μεταξύ των επιλογών Model Validation και Parameter Estimation επιλέγουμε τη δεύτερη και το πρόγραμμα κάνει χρήση αλγορίθμων ελαχίστων τετραγώνων και μέγιστης πιθανοφάνειας για την εκτίμηση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, ενώ ακολουθεί επίσης αλγορίθμους που αποσκοπούν στη μείωση των απαραίτητων υπολογισμών και πετυχαίνει σχετικά γρήγορη σύγκλιση για ένα σύστημα αυτού του μεγέθους.

Το μοντέλο παλινδρομείται στο συνολικό training dataset μέσω του parameter estimation module και λαμβάνουμε ως βέλτιστες τις παραμέτρους:

acoarse	c1	c2	c4	cn	a
----------------	-----------	-----------	-----------	-----------	----------

0.71946	-0.00454	-2.09E-05	1.7304	0.000461	0.867158
----------------	----------	-----------	--------	----------	----------

Πραγματοποιούμε προσομοιώσεις για όλα τα interpolation datapoints μέσω του validation module και εξάγουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Regressed Interpolation

exDryFeed	exclinker	expozzolane	exGypsum	exLimestone	exflyash	exSepSpeed	Blaine Prediction
70.35458	0.940245	0	0.037752	0.017	0	196.099	4180.9329
67.54532	0.939	0	0.025	0.031	0	200.1142	4127.3601
73.7541	0.935196	0	0.035804	0.024	0	195.0136	4716.723
82.72781	0.68111	0.088385	0.019	0.11	0.073539	165.5075	4471.2258
74.05458	0.781771	0.096256	0.032	0.062	0	181.3593	4117.0551
65.15137	0.953511	0	0.028649	0.013018	0	192.4416	4195.2946
66.48389	0.949	0	0.037	0.007	0	201.934	4740.1321
74.38338	0.641114	0.185327	0.021559	0.124	0	161.431	3853.0405
79.28583	0.963	0	0.015	0.007	0	160.8174	4224.1523
65.5704	0.9335	0	0.0335	0.028	0	200.6673	5016.5238

Πραγματοποιούμε προσομοιώσεις για όλα τα extrapolation datapoints μέσω του validation module και εξάγουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Regressed Extrapolation

exDryFeed	exclinker	expozzolane	exGypsum	exLimestone	exflyash	exSepSpeed	Blaine Prediction
57.00257	0.770723	0.10924	0.026021	0.068	0	203.2229	4700.82
90.91341	0.670133	0.073489	0.02	0.118356	0.09	150.4513	4554.671
86.25383	0.6795	0.155	0.03	0.1075	0	151.8392	4530.414
89.09739	0.672223	0.146589	0.027189	0.126	0	149.8842	4561.524
88.71505	0.657463	0.154537	0.02	0.14	0	143.4583	4705.322
90.0309	0.667936	0.09	0.025298	0.1105	0.078291	152.6144	4764.58

90.46218	0.648619	0.096907	0.023461	0.118	0.085	154.3467	4550.608
88.03474	0.661447	0.146711	0.023833	0.14	0	149.8842	4859.956
55.15532	0.772	0.096	0.028	0.078	0	214.9252	4581.238
87.21162	0.657273	0.159225	0.025497	0.13	0	152.3128	4757.553

4.4. Δημιουργία και αξιοποίηση Δεδομένων (Επαναληπτική παλινδρόμηση):

Το μοντέλο παλινδρομείται διαδοχικά σε κάθε ένα από τα σημεία του ίδιου data set και λαμβάνονται

οι βέλτιστες τιμές $acoarse$, $c1$, $c2$, $c4$, cn , a για κάθε ομάδα inputs:

ANN Training dataset

Training Data Point	$acoarse$	$c1$	$c2$	$c4$	cn	a
1	0.711042	-0.004573	-0.000079	1.722870	0.000613	0.867347
2	0.696186	-0.003626	-0.000060	1.761230	0.000650	0.885033
3	0.691637	-0.004228	-0.000065	1.736850	0.000796	0.886999
4	0.711495	-0.004544	-0.000091	1.725190	0.000617	0.865095
5	0.715481	-0.003775	-0.000416	1.780050	0.000745	0.819438
6	0.701680	-0.004863	-0.000076	1.711140	0.000771	0.875127
7	0.712766	-0.004490	-0.000113	1.729320	0.000618	0.860810
8	0.711818	-0.004532	-0.000097	1.726070	0.000617	0.864091
9	0.720268	-0.003632	-0.000534	1.790920	0.000728	0.802396

4.5. Νευρωνικό Μοντέλο:

Το training των νευρωνικών δικτύων έγινε με χρήση του API Keras με τη βιβλιοθήκη του tensorflow.

Κώδικας python γράφτηκε στο περιβάλλον colaboratory της Google. Το Colaboratory είναι browser based text editor που έχει προεγκατεστημένα modules που συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές machine learning. Συγκεκριμένα για τον χειρισμό των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα modules

pandas και numpy. Για το data preprocessing, τον διαχωρισμό τους, καθώς και δείκτες σύγκλισης χρησιμοποιήθηκαν τα sklearn.preprocessing και sklearn.metrics αντίστοιχα. Για γραφήματα το matplotlib.

Τα feed forward νευρωνικά δίκτυα των 2500, 1000 και 100 δεδομένων έγιναν με 3 dense hidden layers των 128 νευρώνων το καθένα. Ο ρυθμός μάθησης ήταν ίσος με 0.0001 ενώ το batch size ήταν σε κάθε περίπτωση το μισό ολόκληρου του data set και τα epochs είναι διαφορετικά σε κάθε νευρωνικό δίκτυο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε είναι ότι το εκάστοτε δίκτυο εκπαιδεύτηκε αρχικά σε μεγάλο αριθμό epochs και τελικά επιλέγονταν αυτός από τον οποίο και μετά τα loss function (mean squared error) των training και των testing set απέκλιναν. Για activation functions των hidden layers χρησιμοποιήθηκε η rectified linear unit (relu), για την ταχύτητα που προσφέρουν απενεργοποιώντας ένα μέρος των νευρώνων του δικτύου, ενώ για το layer των outputs χρησιμοποιήθηκε απλή γραμμική (Linear).

Interpolation Point	acoarse	c1	c2	c4	cn	a
1	0.716277	-0.004780	-0.000022	1.714513	0.000594	0.860994
2	0.709603	-0.004843	-0.000013	1.711080	0.000673	0.869095
3	0.708988	-0.004813	-0.000020	1.712447	0.000675	0.870061
4	0.739714	-0.002986	-0.000438	1.819773	0.000455	0.772824
5	0.724455	-0.003920	-0.000101	1.761484	0.000524	0.835874
6	0.721128	-0.004079	-0.000100	1.752050	0.000544	0.844518
7	0.732425	-0.003527	-0.000127	1.786160	0.000485	0.811657
8	0.727334	-0.003780	-0.000104	1.769990	0.000509	0.827770
9	0.738996	-0.003228	-0.000481	1.805917	0.000420	0.789638
10	0.708952	-0.004794	-0.000025	1.713389	0.000672	0.870180

4.5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων υβριδικού μοντέλου:

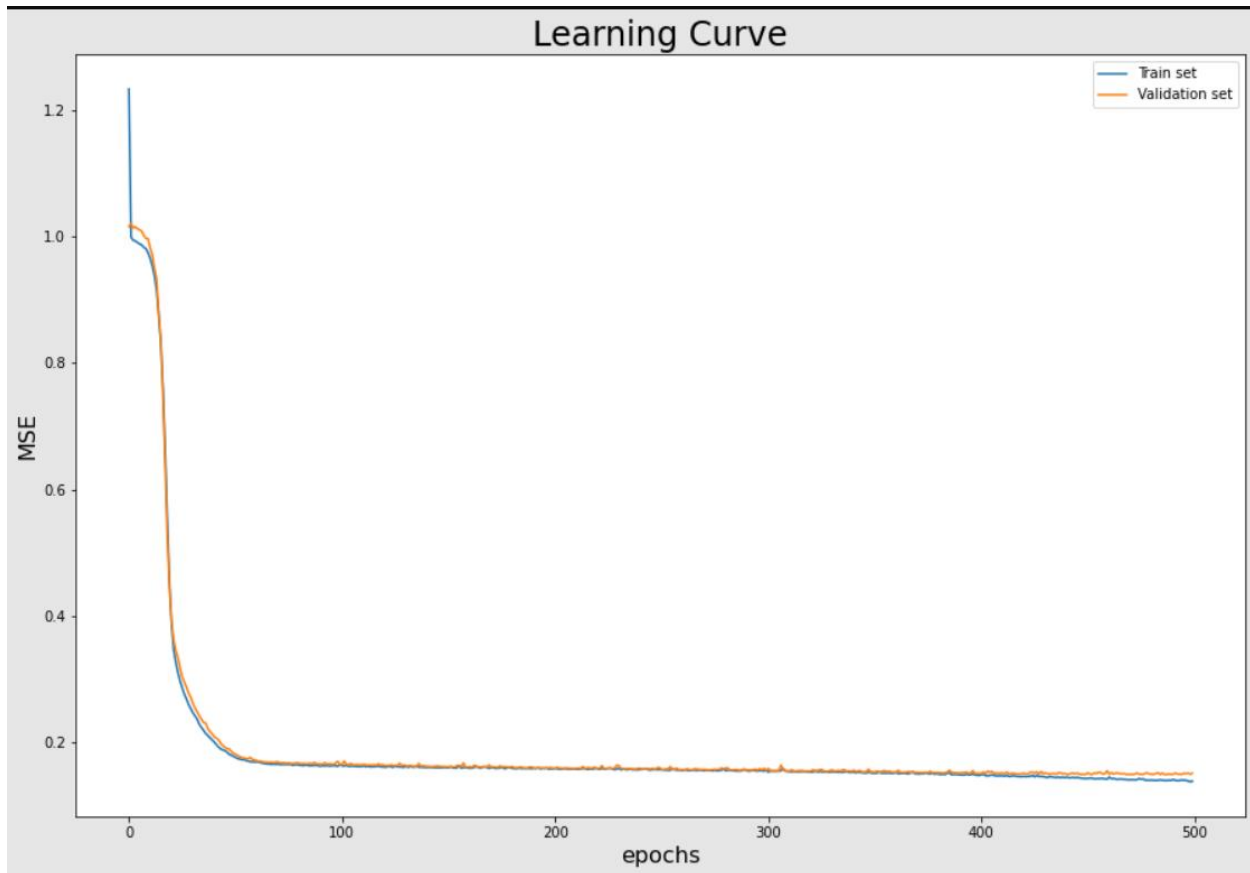
Hybrid Interpolation

exDryFeed	exlinker	expozzolane	exGypsum	exLimestone	exflyash	exSepSpeed	Blaine Prediction
70.35458	0.940245	0	0.037752	0.017	0	196.099	4049.225
67.54532	0.939	0	0.025	0.031	0	200.1142	3974.631
73.7541	0.935196	0	0.035804	0.024	0	195.0136	4159.018
82.72781	0.68111	0.088385	0.019	0.11	0.073539	165.5075	4290.996
74.05458	0.781771	0.096256	0.032	0.062	0	181.3593	4443.577
65.15137	0.953511	0	0.028649	0.013018	0	192.4416	4392.288
66.48389	0.949	0	0.037	0.007	0	201.934	4102.98
74.38338	0.641114	0.185327	0.021559	0.124	0	161.431	5057.537
79.28583	0.963	0	0.015	0.007	0	160.8174	3059.334
65.5704	0.9335	0	0.0335	0.028	0	200.6673	4024.601

Hybrid Extrapolation

exDryFeed	exlinker	expozzolane	exGypsum	exLimestone	exflyash	exSepSpeed	Hybrid Model
57.00257	0.770723	0.10924	0.026021	0.068	0	203.2229	4727.293
90.91341	0.670133	0.073489	0.02	0.118356	0.09	150.4513	4405.091
86.25383	0.6795	0.155	0.03	0.1075	0	151.8392	4627.072
89.09739	0.672223	0.146589	0.027189	0.126	0	149.8842	4811.191
88.71505	0.657463	0.154537	0.02	0.14	0	143.4583	4845.91
90.0309	0.667936	0.09	0.025298	0.1105	0.078291	152.6144	4659.681
90.46218	0.648619	0.096907	0.023461	0.118	0.085	154.3467	4620.304
88.03474	0.661447	0.146711	0.023833	0.14	0	149.8842	4866.036
55.15532	0.772	0.096	0.028	0.078	0	214.9252	5016.825
87.21162	0.657273	0.159225	0.025497	0.13	0	152.3128	4819.048

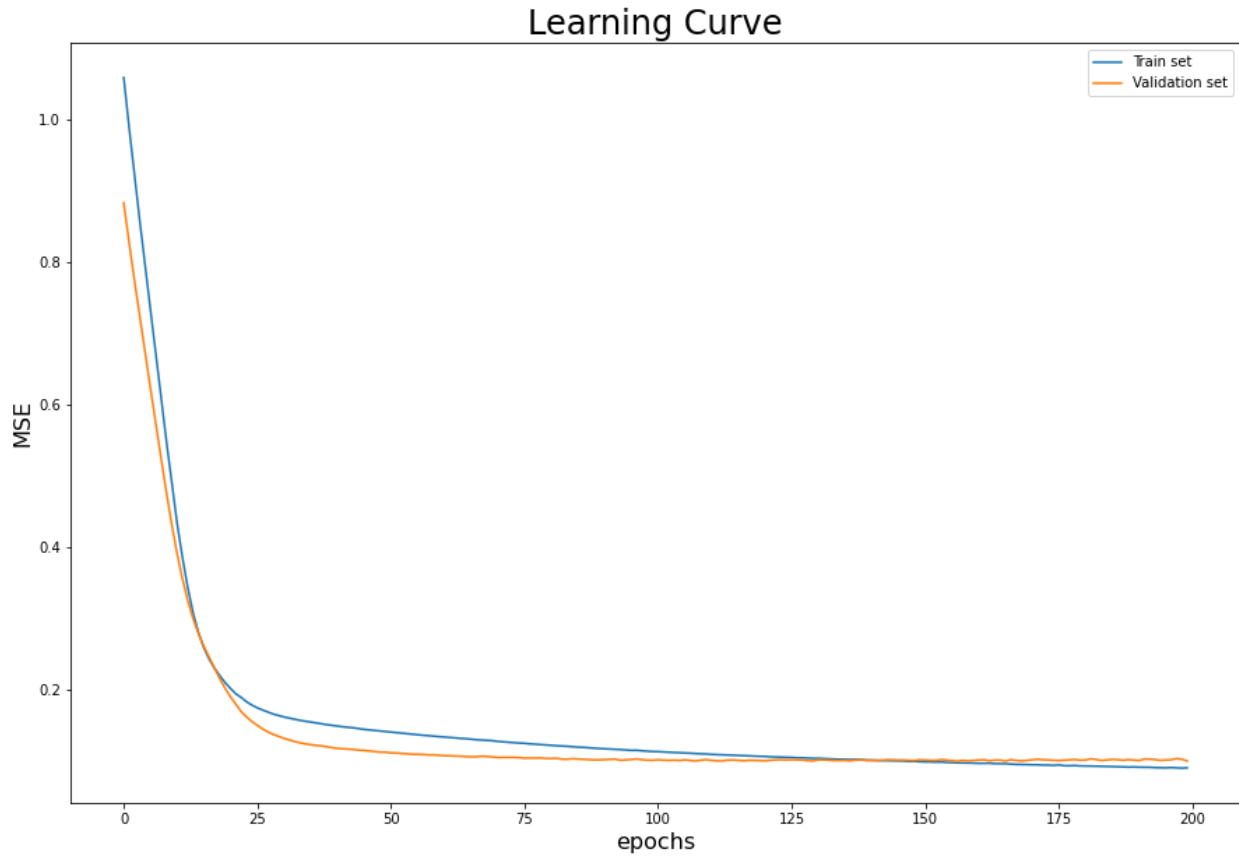
4.6. Αμιγώς data based μοντέλα:



Σχήμα 5: Αναπαράσταση του σφάλματος των *training* και *validation set* ανά κύκλο τροφοδοσίας του *dataset* στο νευρωνικό δίκτυο των 2500 *data points*.

All Data Learning Curve

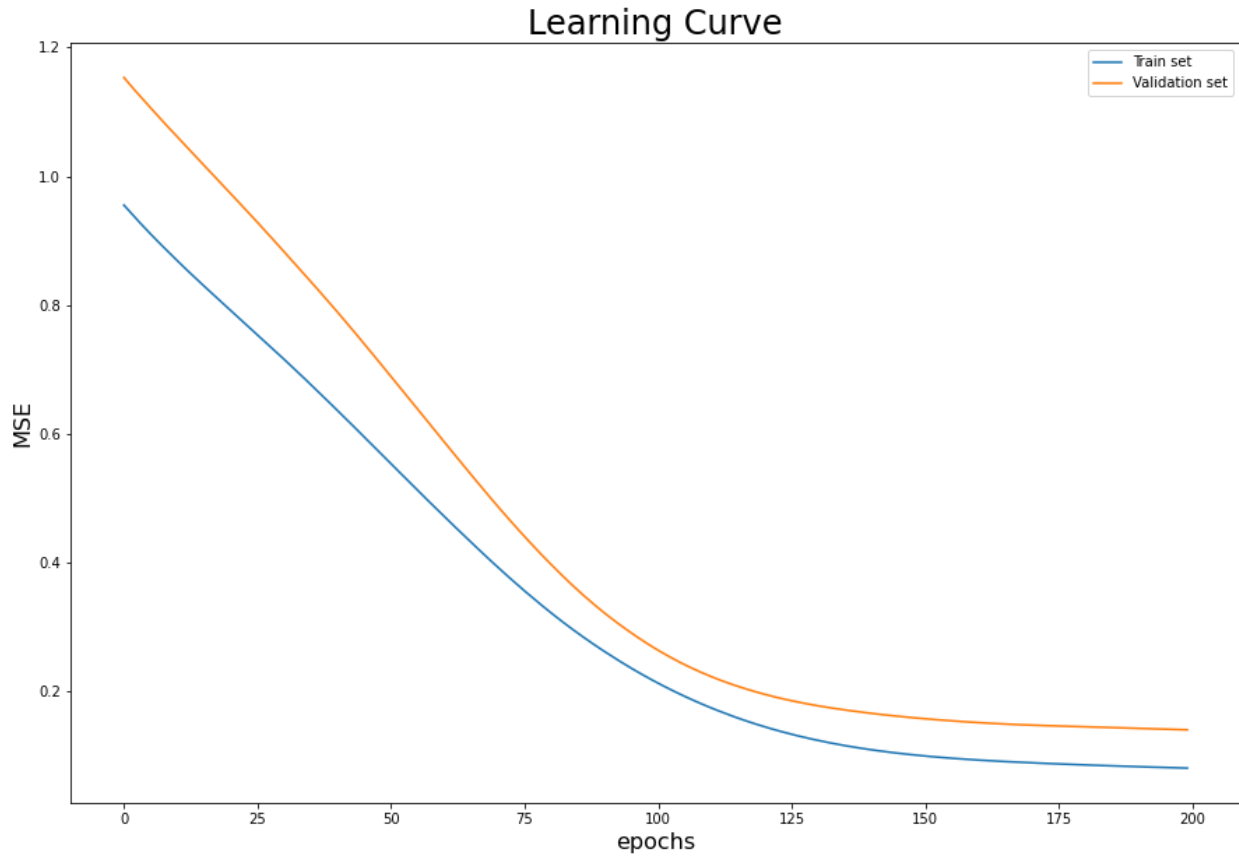
Μετά από το 400^ο epoch παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των MSE των *training* και *validation set* κάτι που υποδηλώνει *overfitting*. Οπότε ο βέλτιστος αριθμός epochs θεωρούνται οι 400 και επιλέγονται για το *training*.



Σχήμα 6: Αναπαράσταση του σφάλματος των training και validation set ανά κύκλο τροφοδοσίας του dataset στο νευρωνικό δίκτυο των 1000 data points.

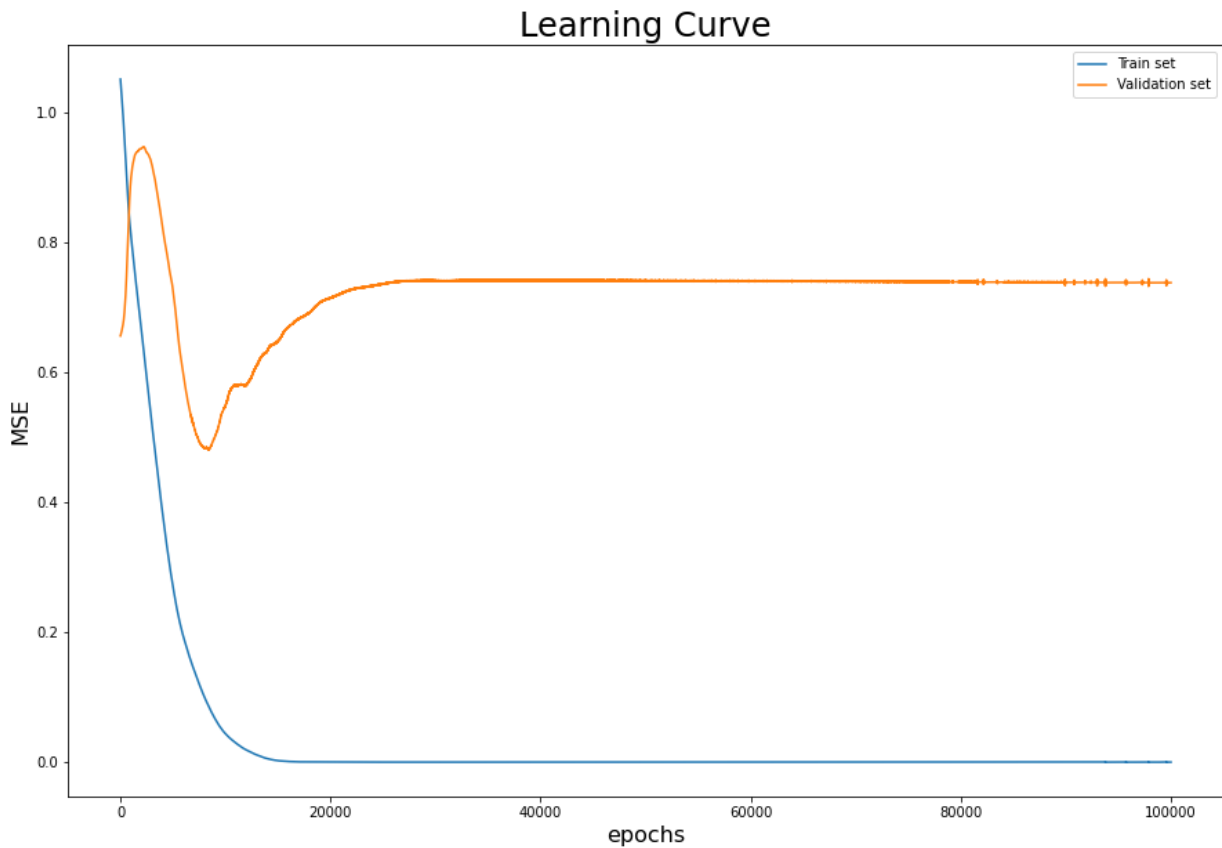
1000 Data Learning Curve

Παρατηρείται απόκλιση μετά το 150^ο epoch οπότε και επιλέγεται για το training του συγκεκριμένου δικτύου.



Σχήμα 7: Αναπαράσταση του σφάλματος των training και validation set ανά κύκλο τροφοδοσίας του dataset στο νευρωνικό δίκτυο των 100 data points.

Το σφάλμα των δυο set είναι συνεχώς μειούμενο. Επιλέγονται τα 200 epochs για να αποφευχθεί overfitting στο training set.



Σχήμα 8: Αναπαράσταση του σφάλματος των training και validation set ανά κύκλο τροφοδοσίας του dataset στο νευρωνικό δίκτυο "Parameter Estimation".

Parameter Estimation ANN Learning Curve

Με την εντολή `model.get_weights()[0]` λαμβάνουμε τα weights του 1^{ου} layer ενώ με την εντολή `model.get_weights()[1]` τα biases του 1^{ου} layer.

Ομοίως λαμβάνουμε και τα weights και biases των υπολοίπων layer.

Τα weights και biases μεταφορτώνονται σαν arrays στο gPROMS Model Builder και με την εισαγωγή των activation functions και normalization και denormalization των inputs και outputs αντίστοιχα ενσωματώνεται το νευρωνικό μοντέλο και καταλήγουμε με το τελικό embedded (hybrid) μοντέλο το οποίο και χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τις εκτιμήσεις μας.

Λαμβάνουμε για το interpolation dataset.

4.7. Σύγκριση και επαλήθευση:

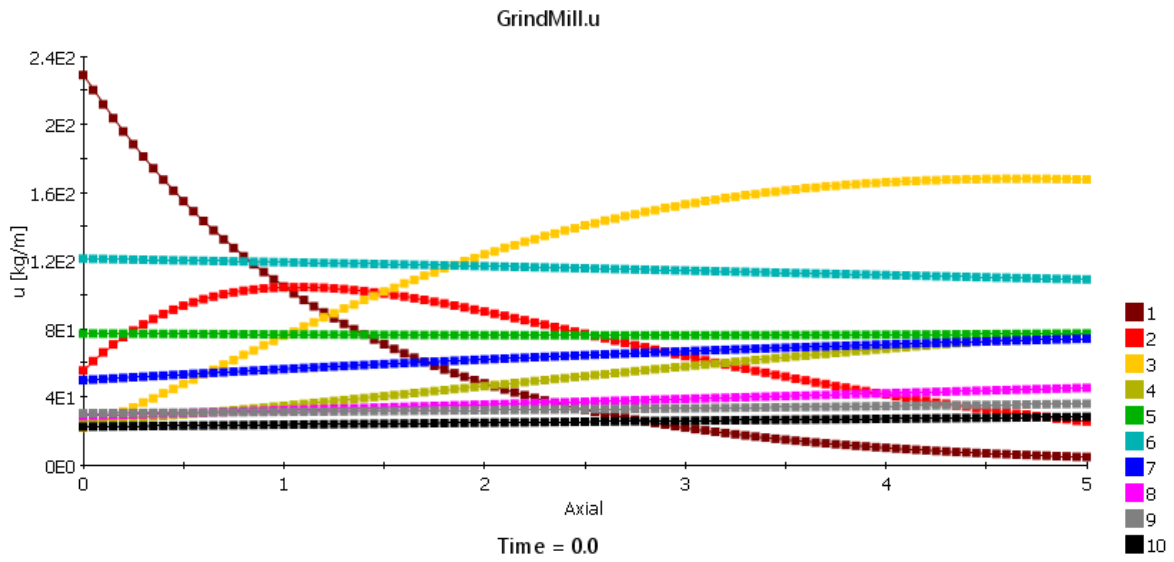
Το προσαρμοσμένο σε πραγματικά δεδομένα μοντέλο σε προσομοίωση με μια τυπική είσοδο:

Qf	(tonnes/h)	70
Vs	(rpm)	185
Clinker content		0.678529968
Pozzolan content		0.176887589
Gypsum content		0.019602174
Limestone content		0.125
Fly-Ash content		0

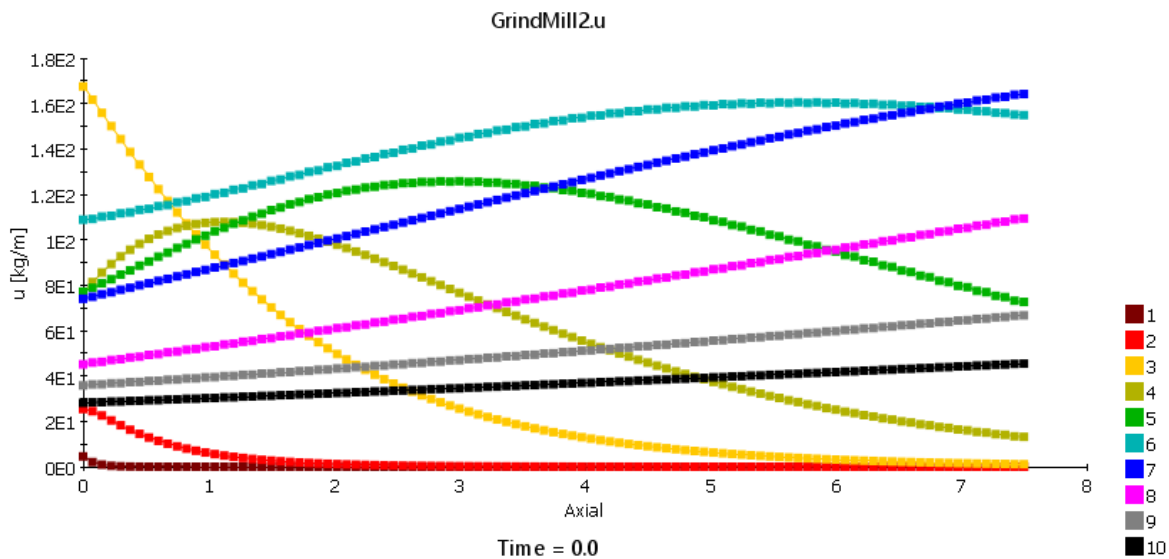
Οι καμπύλες από 1 έως 10 αντιστοιχούν σε σωματίδια διαμέτρων:

Size interval	Διάμετρος Σωματιδίου (μm)
1	5000
2	500
3	192
4	128
5	64
6	32
7	16
8	8
9	4
10	1

μας παρέχει μια εικόνα της μετατροπής των σωματιδίων κατά μήκος των δύο διαμερισμάτων του μύλου:



Σχήμα 9: Simulated Μετατροπή σωματιδίων τσιμέντου κατά μήκος του 1^{ου} διαμερίσματος του μύλου για 10 διαστήματα διαμέτρων σωματιδίων.

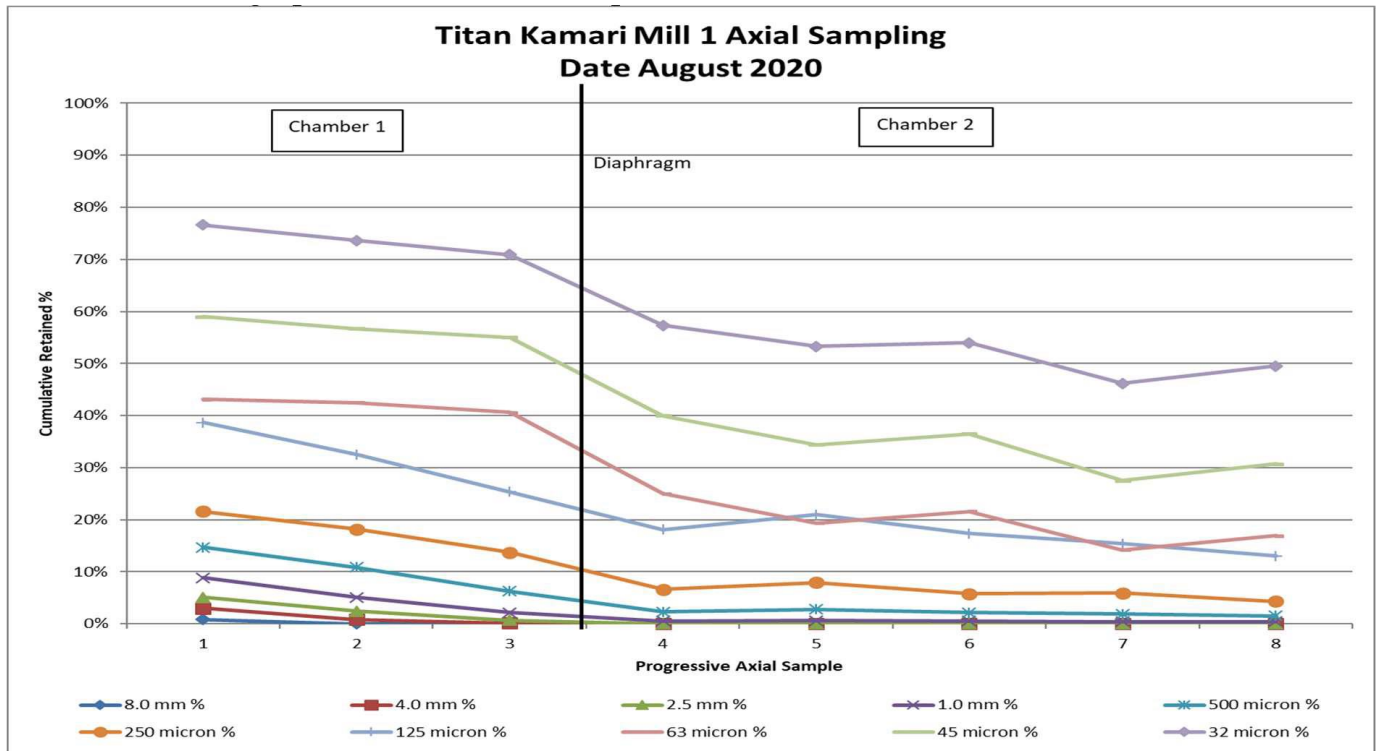


Σχήμα 10: Simulated Μετατροπή σωματιδίων τσιμέντου κατά μήκος του 2^{ου} διαμερίσματος του μύλου για 10 διαστήματα διαμέτρων σωματιδίων.

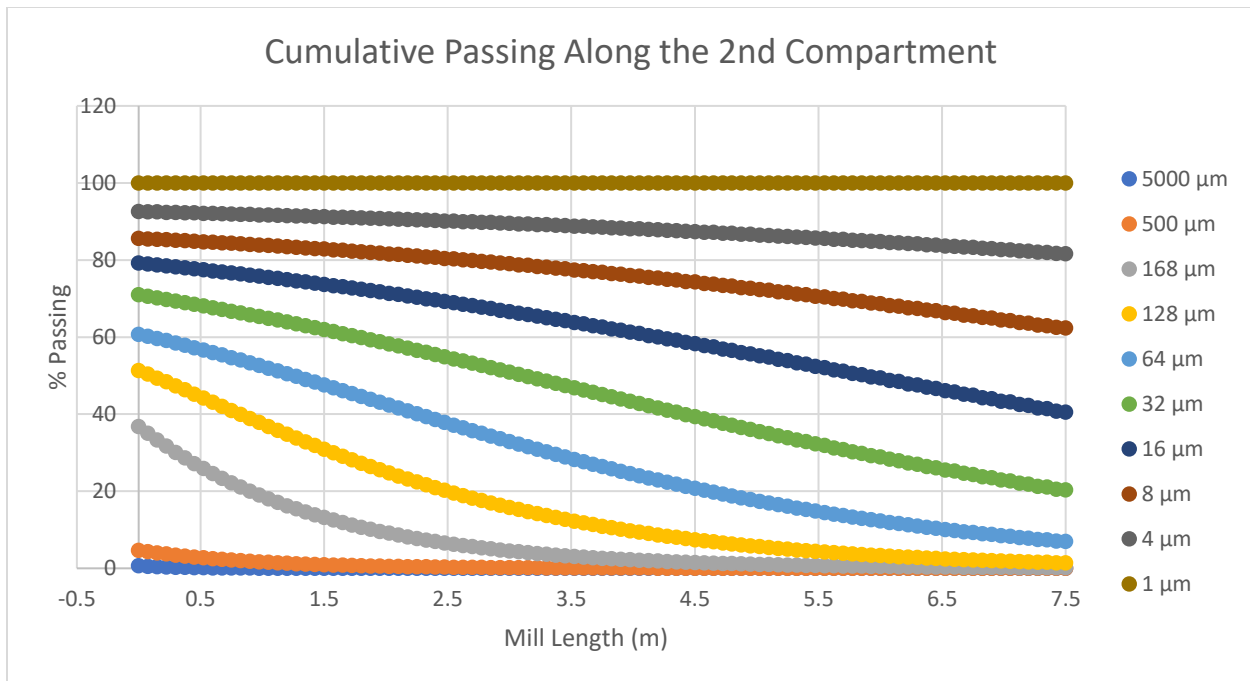
Παρατηρούμε συνεχή μείωση της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων. Επίσης παρατηρείται σχεδόν πλήρη θραύση των σωματιδίων μεγαλύτερης διαμέτρου από τα 500 μm. Αυτό είναι σε συμφωνία με τα δεδομένα του γενικού ελέγχου του Αυγούστου 2020 που πραγματοποιήθηκε στο εξεταζόμενο κύκλωμα άλεσης όπου τα σωματίδια διαμέτρου έως και 500 μm αποτελούν περίπου το 5% του holdup στον μύλο στην είσοδο του δεύτερου διαμερίσματος. Πιο συγκεκριμένα σε μήκος 0 στο διαμέρισμα 2 έχουμε την εξής κατανομή:

Διάμετρος Σωματιδίων (μm)	Κλάσμα Holdup σωματιδίων (είσοδος 2^{ου} διαμερίσματος) (kg/m)
5000	3.33
500	20.74
192	165.88
128	74.95
64	48.13
32	52.99
16	42.40
8	33.22
4	35.88
1	38.16

Το κλάσμα του holdup σε σωματίδια διαμέτρου έως και 500 μm είναι 4.7%.

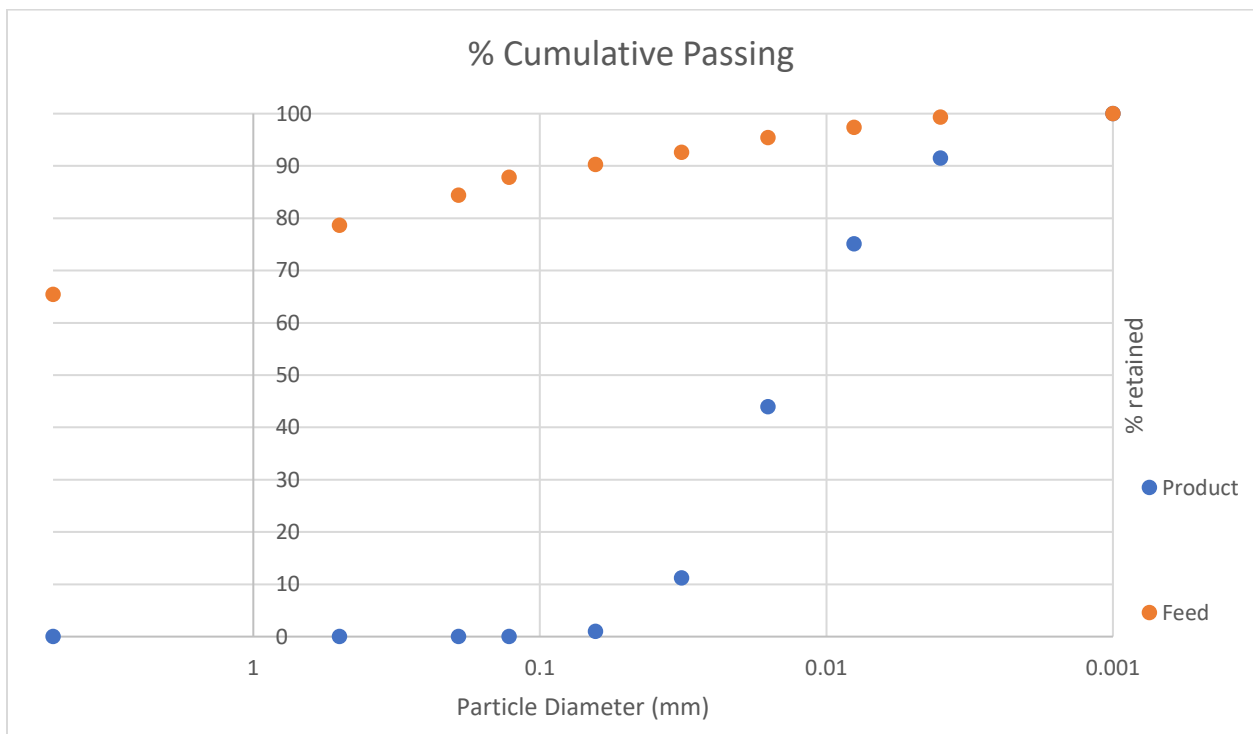


Σχήμα 11: Cumulative Passing κατά μήκος του πραγματικού μύλου για 10 διαστήματα διαμέτρων σωματιδίων.



Σχήμα 12: Simulated Cumulative Passing κατά μήκος του δεύτερου διαμερίσματος του μύλου για 10 διαστήματα διαμέτρων σωματιδίων.

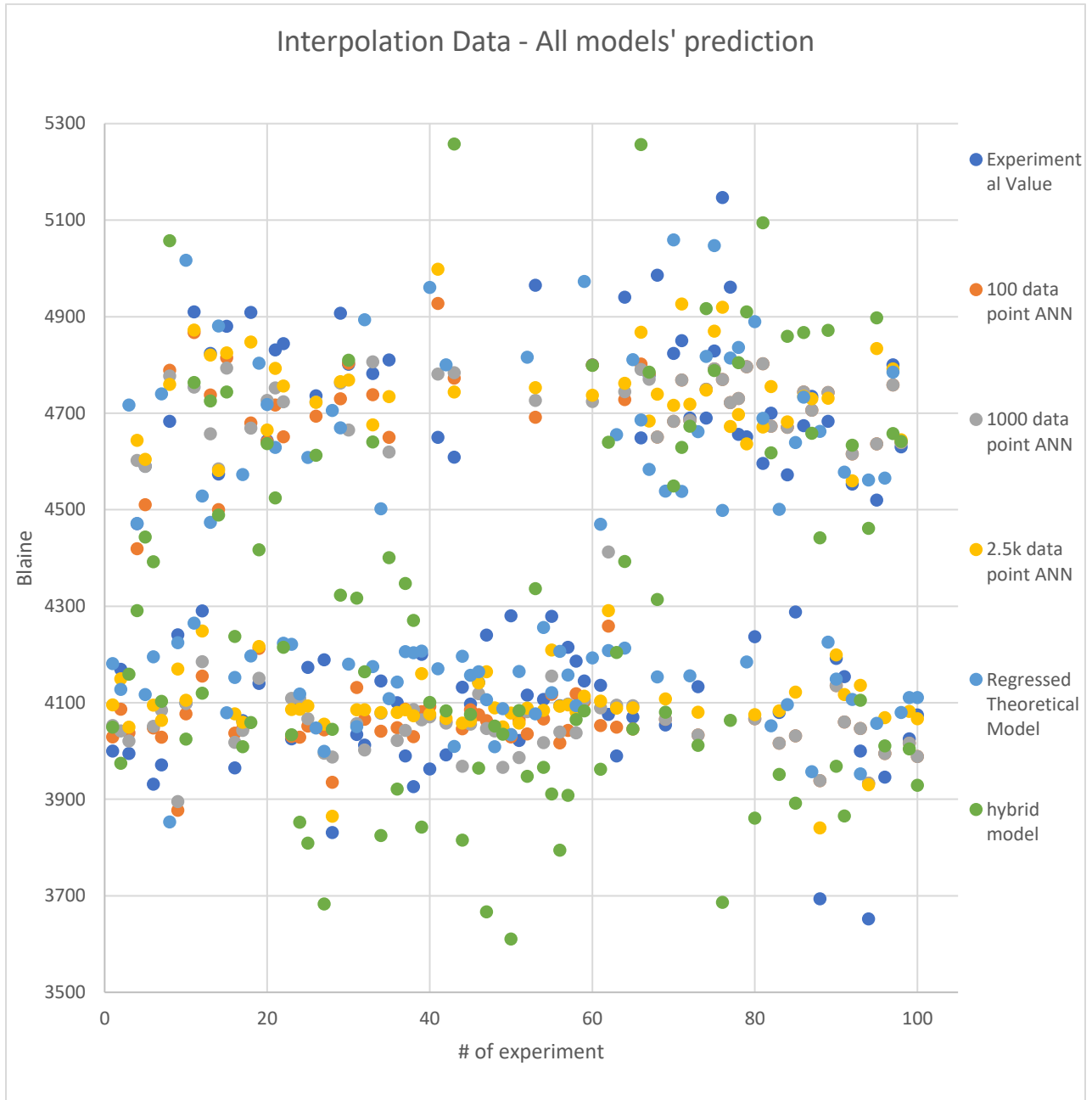
Τα δεδομένα που έχουμε από τον έλεγχο δείχνουν πως 50% passing παρατηρείται στα 32 μm ενώ στην προσομοίωσή μας η αντίστοιχη τιμή παρατηρείται στα 14 μm. Δεδομένου όμως του ότι δεν ξέρουμε τις ακριβείς συνθήκες λειτουργίας του μύλου υπό της οποίες πάρθηκε το δείγμα, και του ότι η τιμή του 50% passing βρίσκεται στη μέση της απότομης μεταβολής, όπως φαίνεται και στο σχήμα δηλώνει ότι μπορεί η απόκλιση να οφείλεται στην αραιή κατάτμηση του φάσματος των διαμέτρων των σωματιδίων. Οι δύο τιμές των διαμέτρων του 50% passing είναι διαδοχικές στο μοντέλο μας. Είναι πιθανό ότι με πύκνωση των intervals οι τιμές θα βρισκότουσαν πιο κοντά.



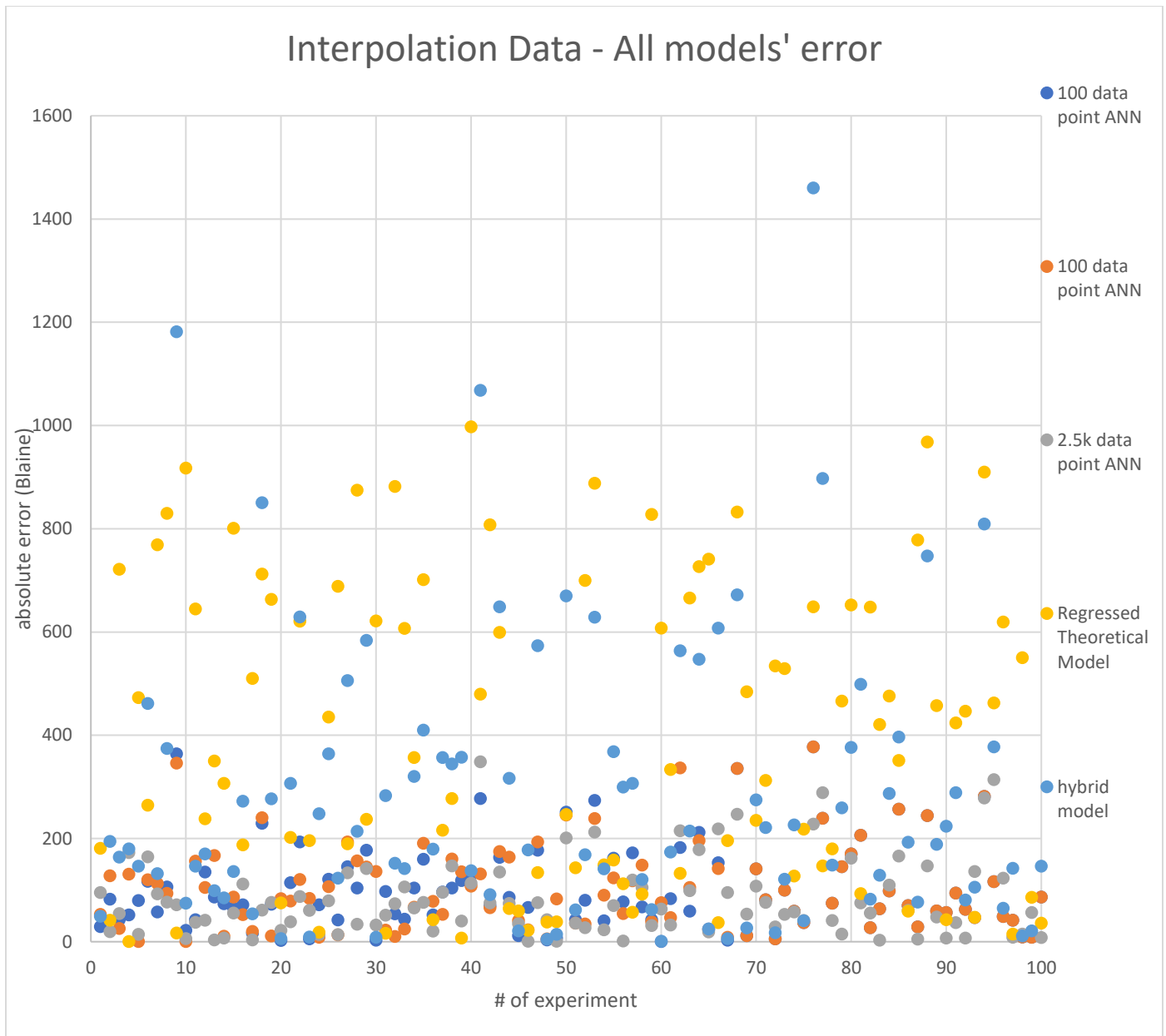
Σχήμα 13: Simulated Cumulative Passing τελικού προϊόντος.

Interpolation Data:

Ενδεικτικά αποτελέσματα



Σχήμα 14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα σύγκρισης εξόδου όλων των μεθόδων με τα πειραματικά σημεία σε συνθήκες παρεμβολής.



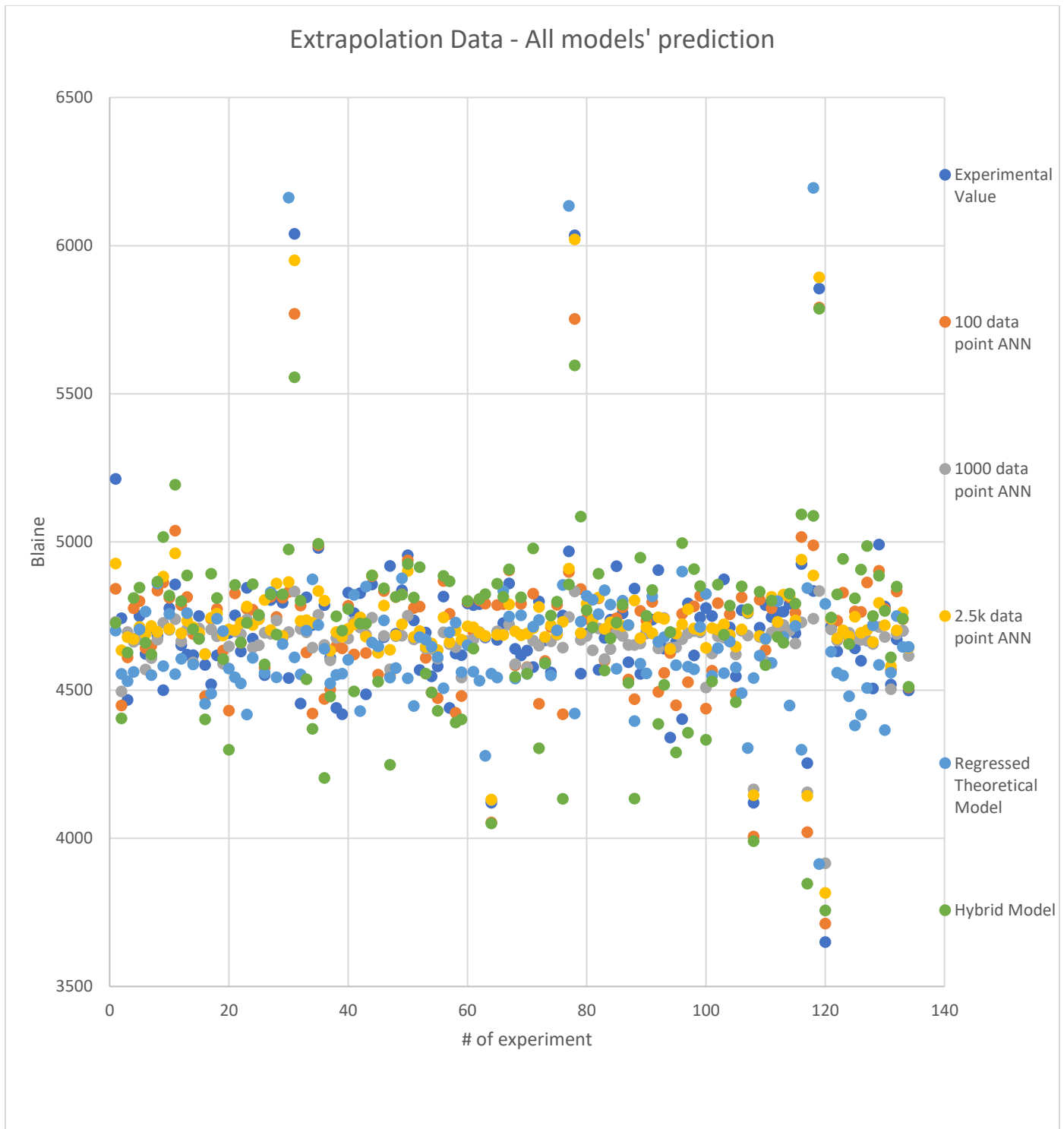
Σχήμα : Συγκεντρωτικό διάγραμμα σύγκρισης απόλυτης απόκλισης όλων των μεθόδων από τα πειραματικά σημεία σε συνθήκες παρεμβολής.

METRICS	100 DATA POINT ANN	1000 DATA POINT ANN	2.5K DATA POINT ANN	REGRESSED THEORETICAL MODEL	HYBRID MODEL
MAE	101.6	105.3	82.0	392.1	282.2
MSE	17241.7	24116.7	12243.5	239102.8	153006.1
RMSE	131.3	155.3	110.7	488.98	391.2

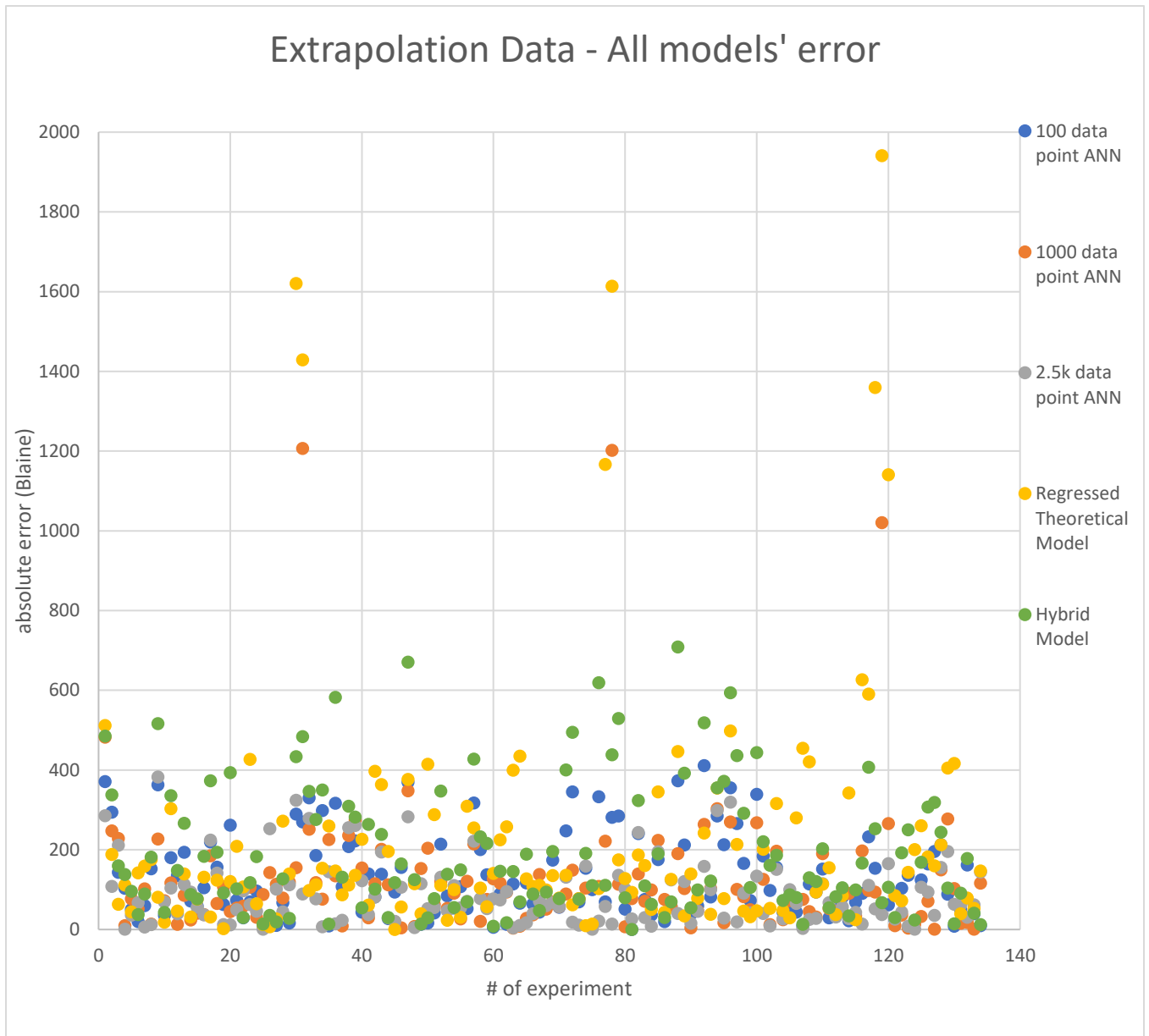
Αναμενόμενα παρατηρείται το ελάχιστο απόλυτο σφάλμα στο μοντέλο που εξήχθη από το νευρωνικό δίκτυο που εκπαιδεύτηκε με το μέγιστο σύνολο δεδομένων. Το μέγιστο σφάλμα παρατηρείται στο θεωρητικό μοντέλο που έχει τις 6 παραμέτρους regressed στο σύνολο των δεδομένων. Ενώ αναμένεται μείωση του σφάλματος πρόβλεψης με την αύξηση των δεδομένων με τα οποία το νευρωνικό δίκτυο γίνεται train παρατηρείται η αντίθετη τάση μεταξύ των μοντέλων των 100 και 1000 data – trained ANN. Είναι πιθανό ότι το dataset είναι κακώς ορισμένο, καθώς αποτελεί το 1/25 του. Η επιλογή των 100 δεδομένων ωστόσο φαίνεται αντιπροσωπευτική του δείγματος, δεδομένου ότι η διαφορά στο εύρος των μετρήσεων Blaine οφείλεται στο φιλτράρισμα των ακραίων τιμών λειτουργίας ώστε να χρησιμοποιηθούν αργότερα για extrapolation validation.

Blaine		Blaine	
count	100.000000	count	2444.000000
mean	4374.435000	mean	4373.822013
std	353.717834	std	358.110526
min	3825.000000	min	3650.000000
25%	4064.750000	25%	4068.000000
50%	4194.000000	50%	4217.500000
75%	4674.500000	75%	4697.000000
max	5085.000000	max	6040.000000

Μια πιο πιθανή αιτία θα ήταν να περιέχει data points με μεγάλη συνάφεια με αυτή του dataset που έγινε trained το 100 Data point ANN, δίνοντάς του μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα από αυτή που θεωρητικά θα έπρεπε να έχει.



Σχήμα 15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα σύγκρισης εξόδου όλων των μεθόδων με τα πειραματικά σημεία σε συνθήκες προεκβολής.



Σχήμα 16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα σύγκρισης απόλυτης απόκλισης όλων των μεθόδων από τα πειραματικά σημεία σε συνθήκες προεκβολής.

METRICS	100 DATA POINT ANN	1000 DATA POINT ANN	2.5K DATA POINT ANN	REGRESSED THEORETICAL MODEL	HYBRID MODEL
MAE	130.5	125.9	87.0	232.1	191.7
MSE	27638.2	46815.2	13977.8	159315.9	62819.5
RMSE	166.2	216.4	118.2	399.1	250.6

Το extrapolation dataset είναι εκτός του εύρους του training dataset αλλά όχι σε μεγάλη απόσταση από αυτό. Κατά συνέπεια, όλα τα μοντέλα διατηρούν ικανοποιητική ακρίβεια. Το παλινδρομημένο μοντέλο παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση με το extrapolation dataset απ' ό τι με το interpolation dataset. Η καλή ακρίβεια προεκβολής είναι μέσα στις δυνατότητες ενός first principles μοντέλου. Παρόλα αυτά θεωρητικά δεν θα έπρεπε να δούμε μεγάλη διαφορά στο regressed μοντέλο σε interpolation και extrapolation. Ίσως η διαφορά να εξομαλυνόταν με μεγαλύτερα testing set.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα - Συζήτηση

- Η παρούσα έρευνα αποτελεί οπότε ένα proof of concept της μεθόδου αναβάθμισης του μοντέλου μας και της βελτίωσης που μπορεί να επιφέρει στα θεωρητικά μοντέλα που εφαρμόζεται. Είναι ενδεικτική της θέσης ότι τα in silico δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν μεταξύ άλλων και για περαιτέρω προσαρμογή του μοντέλου. Το υβριδικό μοντέλο αποδίδει σταθερά καλύτερα από το προσαρμοσμένο φυσικό μοντέλο σε κάθε περίπτωση. Η συμπεριφορά αυτή είναι ενδεικτική της ικανότητας που πιστεύουμε ότι το μοντέλο μπορεί να επιτύχει. Με χρήση μεγαλύτερου dataset κατά την εκπαίδευση του νευρωνικού μοντέλου η προβλεπτική ικανότητα του εκτιμούμε πως θα βελτιωθεί δραστικά. Σε κάθε περίπτωση, η μέθοδος φαίνεται ιδιαίτερα υποσχόμενη συγκεκριμένα για την προσομοίωση περίπλοκων συστημάτων στα οποία οι κλασικές εξισώσεις δεν επαρκούν για να περιγράψουν τις περιεχόμενες διεργασίες. Προσφέρει ένα επιπλέον layer προσαρμογής στα παρεχόμενα δεδομένα και διατηρεί της δυνατότητες προεκβολής ενός first principles μοντέλου.
- Λόγω του ότι η συσχέτιση των εισόδων με τις παραμέτρους έχει γίνει με μη επαρκές πλήθος δεδομένων οδηγηθήκαμε στο να κάνουμε υπερπροσαρμογή στο data set που είχαμε ώστε να προσεγγίσουμε τις παραμέτρους όσο το δυνατόν γίνεται ως προς την τάξη μεγέθους τους. Το μοντέλο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στη μεταβολή των παραμέτρων και δη των a , a_{coarse} και c_n , οπότε σε λιγότερο αυστηρή προσαρμογή οι παράμετροι ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση.
- Η μέθοδος είναι γενική και βρίσκει εφαρμογή θεωρητικά σε όλα τα θεωρητικά μοντέλα που είναι αρκετά ταχεία στην προσομοίωση ώστε να γίνει παλινδρόμηση των παραμέτρων τους

αρκετές φορές ώστε να παραγάγουν ικανό dataset για αν εκπαιδευτεί επαρκώς ένα νευρωνικό δίκτυο.

- Η προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου στα πειραματικά σημεία στο στάδιο της παραγωγής του inputs – parameters dataset ήταν ακριβέστατη σε κάθε σημείο, με την έννοια ότι η απόκλιση που κατάφερε ήταν πρακτικά μηδενική. Αυτό είναι κάτι το αναμενόμενο δεδομένου ότι οι έξι προσαρμόσιμες παράμετροι έδιναν μεγάλη ελευθερία στον αλγόριθμο να επιτύχει την επιθυμητή τιμή. Με τον τρόπο αυτό όμως ίσως θυσιάζεται η γενικότητα. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός παραμέτρων που επιλέγει ο αλγόριθμος για να επιτύχει την σύγκλιση είναι επαρκής για το εκάστοτε πειραματικό σημείο αλλά είναι πιθανό ότι οι ενδιάμεσες τιμές των παραμέτρων που θα εκτιμήσει το υβριδικό μοντέλο να μην έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς δεν υπάρχει γενικότερο μοτίβο στην επιλογή τους. Με περιορισμό των ορίων μεταξύ των οποίων οι παράμετροι μπορούν να πάρουν τιμές το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται, όπως και με την παραγωγή μεγαλύτερου dataset εκπαίδευσης. Η ίδια σύγκλιση σίγουρα θα μπορούσε να επιτευχθεί ωστόσο και με μια ή δύο παραμέτρους. Αν η προσαρμογή γινόταν με λιγότερες παραμέτρους είναι πιθανό οι σχέσεις που θα περιέγραφαν τελικά τις εισόδους με αυτές να μπορούσαν να ερμηνευτούν ως προς την φυσική πραγματικότητα. Για παράδειγμα, η συνάρτηση που συνδέει την παράμετρο c_2 της εξίσωσης θραύσης θα μπορούσε να προσφέρει μια προσέγγιση της πραγματικής σχέσης που διέπει τη μέση διασπορά της θραύσης των σωματιδίων ενός μείγματος με την περιεκτικότητα των επιμέρους συστατικών της.
- Από τις εκτιμώμενες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που λαμβάνουμε από το parameter estimation μπορούμε να εξάγουμε ένα μέτρο για την ευαισθησία που έχουν τα δεδομένα στις

εισόδους που μελετάμε: Ο αλγόριθμος του Parameter estimation module εκτιμάει τις βέλτιστες τιμές της παραμέτρου c_1 , μια παράμετρος που ορίζει τη βαρύτητα του λόγου σκληρών προς μαλακών συστατικών ως προς τη διασπορά της θραύσης ενός σωματιδίου, με τάξη μεγέθους 0.01. Μπορούμε να εξάγουμε ότι η σύσταση του τσιμέντου έχει τη μικρότερη συνολική επίδραση στο Blaine από τις εισόδους που εξετάζουμε.

- Τα αποτελέσματα για το PSD κατά μήκος του μύλου είναι σε σχετική συμφωνία με την πειραματικά προσδιορισμένη κατανομή. Αυτό είναι ενδεικτικό του ότι η ανάλυσή μας προσεγγίζει τη γενική συμπεριφορά των σωματιδίων του τσιμέντου στον μύλο και του ότι δεν έχει αλλοιωθεί η ταυτότητά του ως first principles derived model.
- Ένας λόγος που πιστεύουμε ότι το υβριδικό μοντέλο περιγράφει την πραγματικότητα περισσότερο από το αναλυτικό μοντέλο είναι επειδή το αναλυτικό μοντέλο έχει παραμέτρους θραύσης που εξαρτώνται μόνο από το υλικό της τροφοδοσίας. Ξέρουμε όμως ότι ανάλογα με το ποσοστό πληρότητας του μύλου και της ταχύτητας περιστροφής του ο μηχανισμός θραύσης που επικρατεί ή ο συνδυασμός των μηχανισμών μεταβάλλεται. Το νευρωνικό μοντέλο έδωσε τη δυνατότητα στις παραμέτρους θραύσης να περιγράψουν διαφορετικούς μηχανισμούς μέσω συναρτήσεων της μαζικής τροφοδοσίας, και κατά συνέπεια της πληρότητας του μύλου.
- Με το διάγραμμα () έχουμε μια εικόνα της διασποράς του σφάλματος της πρόβλεψής μας, ένα μέγεθος που είναι εξίσου σημαντικό με το MAE στην επιλογή μας να επιλέξουμε ένα μοντέλο για soft sensor. Η μέγιστες αποκλίσεις του αναλυτικού και υβριδικού μοντέλου τα καθιστά ίσως απαγορευτικά για μια τέτοια εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψιν αποκλειστικά και μόνο την παρούσα κατάσταση του και το λιγοστό πλήθος δεδομένων στο οποίο εκπαιδεύτηκε. Αντιθέτως το νευρωνικό μοντέλο του συνόλου των δεδομένων έχει μέγιστη απόκλιση της τάξης των 250 Blaine.

- Το μοντέλο δύναται να αντιστραφεί ως προς τις εξόδους του με βάση συγκεκριμένων προδιαγραφών– εισόδου των τιμών του Blaine, του ύψους παραγωγής και της ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης ώστε χρησιμοποιηθεί για να υποδείξει τις κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας για αυτόν τον σκοπό. Αποφάσεις στην παραγωγική διαδικασία μπορούν να στηριχτούν στις υποδείξεις του αντεστραμμένου μοντέλου εφόσον αυτό κριθεί αρκετά ακριβές.
- Για καλύτερη επαλήθευση των προς προσαρμογή παραμέτρων είναι σκόπιμο να υπάρξει μια δευτερεύουσα εξεταζόμενη μέτρηση για να ενταχθεί στην αντικειμενική συνάρτηση κατά την προσαρμογή. Στην προκειμένη μελέτη η ειδική επιφάνεια του προϊόντος ως μοναδική αντικειμενική συνάρτηση περιόρισε τον αριθμό των παραμέτρων και κατά συνέπεια τον βαθμό ελευθερίας του συστήματος. Επίσης η αδυναμία cross reference με άλλη μέτρηση σήμαινε ότι δεν υπήρχε εύκολος τρόπος filtering των data points με αποκλίνουσες τιμές και κατά συνέπεια το σφάλμα της μέτρησης εισάχθηκε στις τιμές των παραμέτρων.
- Κάποιες παράμετροι όπως αυτές της breakage function θα ήταν σκόπιμο να οριστούν βάσει στοχευμένων πειραμάτων. Είναι ακριβή και χρονοβόρα διαδικασία αλλά οδηγεί σε πιο ρεαλιστική απεικόνιση του συστήματος. Αυτά τα μοντέλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για επιλογές σχεδιασμού και βελτιστοποίησης.
- Ενώ η επίδραση της ταχύτητας του διαχωριστή είναι εύκολα κατανοητή και συγκριτικά απλούστερη στην προτυποποίηση, σε κλειστό κύκλωμα ο ρόλος της περιπλέκεται. Σε μεγάλες τιμές περιστροφής η ανακυκλοφορία του μύλου αυξάνεται δυσανάλογα και προκαλεί αυξημένη πληρότητα στον μύλο με αποτέλεσμα οι κρούσεις είναι πιο αναποτελεσματικές. Είναι εφικτό να βρεθεί μια απλοϊκή εμπειρική σχέση που θα περιγράφει τη ενεργειακά ή παραγωγικά βέλτιστη τιμή της ταχύτητας του διαχωριστή σε σχέση με την τροφοδοσία και το holdup. Μια τέτοια σχέση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για αυτόματο έλεγχο της

διεργασίας. Αυτή η σχέση μπορεί να προκύψει από το αντεστραμμένο μοντέλο αν του κάνουμε ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες τιμές μαζικής τροφοδοσίας και ταχύτητας περιστροφής του διαχωριστή. Τα δεδομένα που θα εξάγουμε μπορούν να προσεγγιστούν με ένα νευρωνικό μοντέλο.

- Θα ήταν σκόπιμο να έχουμε φράξει τα αποτελέσματα των outputs που μπορεί να δώσει το νευρωνικό δίκτυο υπολογισμού των παραμέτρων μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της sigmoid activation function στο τελικό layer. Ως έχει, παράμετροι όπως η c_n λαμβάνουν τιμές εκτός των επιθυμητών ορίων.
- Το μοντέλο μας πραγματοποιεί μια προσομοίωση στην περιοχή των 5 δευτερολέπτων, ικανοποιητικός χρόνος για εφαρμογή soft sensor αν επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια και το τυπικό σφάλμα. Δεν έχουμε δοκιμάσει τη συμπεριφορά του σε μεταβατική κατάσταση όμως για να ξέρουμε αν διατηρεί την ταχύτητά του, ώστε να αξιοποιηθεί ως MPC.

Κεφάλαιο 6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Είναι σκόπιμο να εξεταστεί η εξάρτηση του αριθμού των παραμέτρων που μετατρέπονται σε συναρτήσεις με τη συμπεριφορά του υβριδικού μοντέλου στην προσαρμογή σε πραγματικά δεδομένα και στην ακρίβεια πρόβλεψης σε προεκβολή των συνθηκών λειτουργίας.

Ακόμη, η μοντελοποίηση του σφαιρόμυλου σαν σύστημα πολλαπλών αντιδραστήρων πλήρους ανάμιξης συνεχούς λειτουργίας σε σειρά (in series CSTR) [3] χρησιμοποιείται με ικανοποιητικά αποτελέσματα και μπορεί να προσφέρει περιβάλλον εφαρμογής της υβριδικής μεθόδου. Το πλεονέκτημα που θα έχει μια τέτοια εφαρμογή είναι το χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος που προκύπτει από την αντικατάσταση του συστήματος συνήθων διαφορικών με ίσου μεγέθους σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Αυτό καθιστά πιο εύκολη την προσομοίωση του συστήματος σε απλούστερα αλλά γρηγορότερα περιβάλλοντα, όπως και την εισαγωγή δεδομένων (data entry) και τη μεταχείριση των αποτελεσμάτων (data manipulation).

Ακόμη, υπάρχει περιθώριο έρευνας στα δευτερεύοντα μέρη του κυκλώματος της άλεσης τσιμέντου και συγκεκριμένα στον διαχωριστή. Η συνάρτηση της επιστροφής του διαχωριστή φαίνεται να είναι πολυπαραμετρική και όχι μόνο συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του όπως προτάθηκε για τις ανάγκες της μελέτης μας. Πιο συγκεκριμένα είναι σκόπιμο να εξεταστεί η επιστροφή του διαχωριστή συναρτήσει του φορτίου του και της ταχύτητας του αέρα μέσα στον μύλο.

Οι παράμετροι προς μετασχηματισμό είναι σκόπιμο να μετατραπούν σε συναρτήσεις συγκεκριμένων μεταβλητών εισόδου με βάση τη φύση της διεργασίας και όχι όλων των διαθέσιμων. Το αποτέλεσμα πιστεύουμε ότι θα έχει περισσότερο φυσικό νόημα χωρίς να θυσιαστεί σημαντικό μέρος της ακρίβειας του μοντέλου.

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα άλλων εφαρμογών και να προσφέρει ένα επιπλέον επίπεδο προσαρμογής των παραμέτρων θεωρητικών μοντέλων στα διαθέσιμα δεδομένα.

Μοντέλα κυκλωμάτων κάθετων Roller Mills εντός του πεδίου εφαρμογής της μεθόδου.

Κεφάλαιο 7. Βιβλιογραφία

1. S. Peter Kavitha, M. Guruprasath, Arun K. Tangirala, Developing a soft sensor for fineness in a cement ball mill 2014
2. David Mills, Chapter 27 - Erosive Wear, Editor(s): David Mills, Pneumatic Conveying Design Guide (Third Edition), Butterworth-Heinemann, 2016,
3. Jakob Kj_bsted Huusom_, Anker Degn Jensen, MODELLING OF CEMENT GRINDING CIRCUITS FOR PREDICTIVE CONTROL, 2005
4. M. Boulvin, C.Renotte, Modelling, Simulation and Evaluation of Control Loops for Cement Grinding Process
5. Renato Lepore¹, Alain Vande Wouwer¹, Receding-Horizon Estimation and Control of Ball Mill Circuits, 2007
6. L.G. Austin, P.T. Luckie and B.G. Ateya, RESIDENCE TIME DISTRIBUTIONS IN MILLS, 1971
7. Rasoul Fatahi, Kianoush Barani, Modeling and simulation of vertical roller mill using population balance model, 2019
8. A. Farzanegan , E. Ghasemi Ardi, A. Valian, V. Hasanzadeh, Simulation of clinker grinding circuits of cement plant based on process models calibrated using GA search method, 2003
9. Paul W. Cleary, Axial transport in dry ball mills, 2005
10. Fazeel Ahmad, Effects of Mill Speed and Air Classifier Speed on Performance of an Industrial Ball Mill, 2020
11. Yaoyao Bao, Yuanming Zhu, A distributed PCA-TSS based soft sensor for raw meal fineness in VRM system, 2019

12. Breakage Function for HPGR: Mineral and Mechanical Characterization of Tantalum and Tungsten Ores by Hernan Anticoi, Eduard Guasch 2018
13. Mengpin Ge and Johannes Friedrich, 2020, *4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors.*

Κεφάλαιο 8. Παράρτημα

ANN parameter estimation:

Training Data Point	acoarse	c1	c2	c4	cn	a
1	0.711042	-0.004573	-0.000079	1.722870	0.000613	0.867347
2	0.696186	-0.003626	-0.000060	1.761230	0.000650	0.885033
3	0.691637	-0.004228	-0.000065	1.736850	0.000796	0.886999
4	0.711495	-0.004544	-0.000091	1.725190	0.000617	0.865095
5	0.715481	-0.003775	-0.000416	1.780050	0.000745	0.819438
6	0.701680	-0.004863	-0.000076	1.711140	0.000771	0.875127
7	0.712766	-0.004490	-0.000113	1.729320	0.000618	0.860810
8	0.711818	-0.004532	-0.000097	1.726070	0.000617	0.864091
9	0.720268	-0.003632	-0.000534	1.790920	0.000728	0.802396
10	0.702087	-0.004849	-0.000076	1.711710	0.000763	0.874794
11	0.707909	-0.004670	-0.000078	1.718940	0.000666	0.869950
12	0.698884	-0.004947	-0.000075	1.707740	0.000817	0.877461
13	0.717373	-0.003757	-0.000426	1.780160	0.000711	0.817756
14	0.717022	-0.004112	-0.000012	1.740130	0.000448	0.870691
15	0.698607	-0.004990	-0.000078	1.706020	0.000828	0.877563
16	0.711058	-0.004573	-0.000079	1.722920	0.000613	0.867309
17	0.713829	-0.004462	-0.000070	1.726920	0.000555	0.866338
18	0.699425	-0.004944	-0.000077	1.707860	0.000811	0.876960
19	0.704985	-0.004753	-0.000077	1.715590	0.000714	0.872413
20	0.719402	-0.004148	-0.000099	1.745120	0.000510	0.854704
21	0.718281	-0.004097	-0.000008	1.740700	0.000428	0.869186
22	0.708927	-0.004567	-0.000075	1.723140	0.000636	0.869411
23	0.701314	-0.004868	-0.000076	1.710950	0.000776	0.875458
24	0.713300	-0.004491	-0.000076	1.726220	0.000572	0.865828
25	0.704267	-0.004774	-0.000077	1.714760	0.000725	0.873016
26	0.712855	-0.004505	-0.000076	1.725700	0.000581	0.866043
27	0.710026	-0.004604	-0.000079	1.721610	0.000630	0.868193
28	0.711906	-0.004528	-0.000089	1.725690	0.000608	0.865056
29	0.705000	-0.004761	-0.000077	1.715290	0.000715	0.872368
30	0.713241	-0.004487	-0.000070	1.725970	0.000567	0.866680
31	0.713147	-0.004461	-0.000109	1.730310	0.000607	0.860977
32	0.711811	-0.004533	-0.000096	1.725930	0.000616	0.864282
33	0.713052	-0.004478	-0.000113	1.729770	0.000613	0.860626
34	0.712250	-0.004511	-0.000101	1.727330	0.000613	0.863094
35	0.708342	-0.004628	-0.000079	1.720680	0.000653	0.869729

36	0.722500	-0.004118	-0.000129	1.747640	0.000485	0.848992
37	0.710059	-0.004603	-0.000079	1.721660	0.000629	0.868166
38	0.717880	-0.004127	-0.000079	1.747950	0.000550	0.852980
39	0.703517	-0.004800	-0.000077	1.713700	0.000739	0.873627
40	0.712145	-0.004513	-0.000101	1.727330	0.000616	0.863102
41	0.720319	-0.004124	-0.000145	1.748640	0.000527	0.848492
42	0.707303	-0.004689	-0.000078	1.718200	0.000676	0.870456
43	0.729750	-0.003570	-0.000078	1.782760	0.000476	0.822856
44	0.710051	-0.004559	-0.000095	1.724680	0.000635	0.866620
45	0.712714	-0.004494	-0.000109	1.728730	0.000614	0.861555
46	0.711416	-0.004554	-0.000083	1.724110	0.000611	0.866352
47	0.706187	-0.004719	-0.000078	1.716970	0.000694	0.871402
48	0.702431	-0.004829	-0.000076	1.712540	0.000756	0.874549
49	0.722065	-0.004002	-0.000212	1.757740	0.000541	0.839835
50	0.707302	-0.004684	-0.000078	1.718400	0.000675	0.870478
51	0.706312	-0.004714	-0.000078	1.717200	0.000691	0.871306
52	0.704691	-0.004762	-0.000077	1.715230	0.000718	0.872658
53	0.711672	-0.004545	-0.000098	1.725690	0.000622	0.863958
54	0.707943	-0.004664	-0.000078	1.719220	0.000664	0.869946
55	0.724368	-0.003801	-0.000209	1.767950	0.000506	0.836784
56	0.708082	-0.004659	-0.000078	1.719410	0.000662	0.869833
57	0.710780	-0.004581	-0.000079	1.722550	0.000617	0.867565
58	0.713078	-0.004463	-0.000066	1.726580	0.000560	0.867559
59	0.700373	-0.004892	-0.000075	1.709990	0.000791	0.876261
60	0.715625	-0.004072	-0.000019	1.741370	0.000449	0.873382
61	0.711042	-0.004573	-0.000079	1.722870	0.000613	0.867347
62	0.711289	-0.004561	-0.000081	1.723640	0.000611	0.866745
63	0.721249	-0.003965	-0.000079	1.752040	0.000442	0.856142
64	0.721934	-0.003789	-0.000020	1.752120	0.000311	0.869343
65	0.719496	-0.004124	-0.000155	1.749360	0.000546	0.847959
66	0.710815	-0.004539	-0.000094	1.725420	0.000623	0.866028
67	0.711287	-0.003056	-0.000421	1.811760	0.000690	0.838363
68	0.725458	-0.003767	-0.000216	1.770290	0.000500	0.833882
69	0.712841	-0.004477	-0.000065	1.726000	0.000565	0.867706
70	0.717699	-0.004074	-0.000012	1.741230	0.000424	0.870779
71	0.711681	-0.004543	-0.000097	1.725640	0.000621	0.864151
72	0.714510	-0.004299	-0.000149	1.740400	0.000606	0.855317
73	0.718167	-0.004123	-0.000082	1.748460	0.000549	0.851940
74	0.732396	-0.003462	-0.000108	1.789890	0.000463	0.815572
75	0.712967	-0.004344	-0.000145	1.738000	0.000623	0.857674
76	0.718068	-0.003995	-0.000226	1.759790	0.000602	0.842363
77	0.720092	-0.004031	-0.000166	1.754280	0.000538	0.846789
78	0.710953	-0.004540	-0.000093	1.725390	0.000622	0.865808
79	0.707032	-0.003615	-0.000206	1.771180	0.000616	0.863665

80	0.716193	-0.004226	-0.000161	1.744570	0.000590	0.851965
81	0.727784	-0.003620	-0.000082	1.778880	0.000482	0.828423
82	0.728133	-0.003646	-0.000095	1.778020	0.000486	0.826824
83	0.709059	-0.003194	-0.000356	1.800660	0.000664	0.847602
84	0.726326	-0.003801	-0.000024	1.762270	0.000404	0.845208
85	0.718674	-0.004104	-0.000007	1.739990	0.000418	0.869208
86	0.711049	-0.004567	-0.000083	1.723420	0.000615	0.866865
87	0.728176	-0.003674	-0.000028	1.767720	0.000360	0.845391
88	0.716709	-0.004189	-0.000169	1.746840	0.000587	0.850438
89	0.710592	-0.004587	-0.000079	1.722320	0.000620	0.867722
90	0.713878	-0.004398	-0.000119	1.733740	0.000598	0.859353
91	0.717934	-0.004227	-0.000147	1.743710	0.000562	0.850979
92	0.713828	-0.004392	-0.000121	1.734200	0.000600	0.859125
93	0.709781	-0.004359	-0.000144	1.737150	0.000659	0.860893
94	0.712890	-0.004441	-0.000112	1.731270	0.000607	0.861372
95	0.714814	-0.004141	-0.000197	1.750930	0.000626	0.849467
96	0.710541	-0.004545	-0.000094	1.725290	0.000628	0.866140
97	0.712836	-0.004227	-0.000179	1.745690	0.000641	0.853723
98	0.712395	-0.004437	-0.000117	1.731850	0.000616	0.861320
99	0.712250	-0.004511	-0.000101	1.727330	0.000613	0.863094
100	0.712181	-0.004224	-0.000177	1.745690	0.000646	0.854486

Interpolation All Models

Interpolation Data Point	Experimental Value	100 data point ANN	1000 data point ANN	2.5k data point ANN	Regressed Theoretical Model	hybrid model
1	4000	4029.209	4052.772	4095.493	4180.933	4049.225
2	4169	4086.48	4041.497	4149.592	4127.36	3974.631
3	3995	4037.671	4020.587	4049.58	4716.723	4159.018
4	4471	4419.22	4601.88	4643.746	4471.226	4290.996
5	4590	4510.183	4589.474	4604.081	4117.055	4443.577
6	3931	4047.814	4050.889	4095.173	4195.295	4392.288
7	3971	4028.692	4084.007	4063.442	4740.132	4102.98
8	4683	4789.054	4776.87	4759.837	3853.041	5057.537
9	4241	3877.142	3895.097	4169.713	4224.152	3059.334
10	4099	4077.16	4098.484	4105.233	5016.524	4024.601
11	4910	4867.312	4754.017	4872.315	4265.162	4763.799
12	4290	4155.199	4184.925	4248.629	4528.318	4119.873
13	4824	4737.579	4657.144	4820.476	4473.69	4725.337

14	4574	4500.315	4584.77	4581.079	4880.786	4488.981
15	4880	4814.767	4793.509	4824.668	4079.027	4743.936
16	3965	4036.767	4017.639	4076.726	4152.369	4237.154
17	4063	4046.86	4042.866	4059.775	4572.985	4009.128
18	4909	4679.778	4668.88	4847.654	4196.792	4058.715
19	4140	4212.642	4150.926	4216.265	4803.266	4416.739
20	4643	4640.794	4726.178	4665.231	4717.922	4637.187
21	4831	4716.725	4752.059	4792.748	4628.981	4524.503
22	4844	4650.798	4723.606	4756.316	4223.247	4214.708
23	4025	4030.35	4109.124	4085.71	4220.885	4033.873
24	4100	4028.607	4108.618	4086.294	4118.137	3852.15
25	4173	4051.714	4066.611	4093.5	4608.061	3809.156
26	4736	4694.017	4722.776	4722.254	4047.72	4612.98
27	4189	4043.819	3995.572	4055.546	3999.104	3682.993
28	3831	3935.096	3987.463	3864.675	4705.548	4044.809
29	4907	4729.722	4762.467	4765.185	4669.633	4323.03
30	4801	4803.734	4665.154	4768.464	4179.776	4809.773
31	4034	4131.368	4056.669	4085.221	4050.394	4316.847
32	4012	4065.918	4002.062	4085.383	4893.699	4164.198
33	4782	4738.152	4806.368	4675.854	4175.091	4640.301
34	4145	4040.931	4078.07	4079.573	4501.971	3825.061
35	4810	4650.109	4619.397	4734.03	4108.439	4400.322
36	4100	4048.049	4022.029	4079.797	4142.594	3920.869
37	3990	4086.49	4042.907	4085.658	4205.772	4346.997
38	3926	4029.889	4086.099	4072.76	4203.474	4270.435
39	4200	4081.631	4064.378	4159.988	4207.175	3842.437
40	3963	4092.052	4070.789	4076.296	4960.48	4100.559
41	4650	4927.493	4781.104	4998.467	4170.461	5718.244
42	3992	4061.218	4057.853	4067.301	4799.872	4083.2
43	4609	4772.422	4783.8	4744.026	4009.705	5257.626
44	4132	4045.852	3968.257	4057.691	4196.375	3815.44
45	4097	4085.187	4055.691	4062.329	4156.892	4075.953
46	4142	4075.407	4118.827	4140.906	4164.176	3964.234
47	4240	4062.637	4046.854	4164.196	4105.968	3666.457
48	4047	4050.532	4041.346	4089.389	4009.082	4051.872
49	4049	4041.938	3966.049	4049.929	4087.736	4034.814
50	4280	4028.898	4034.449	4078.856	4033.684	3610.254
51	4022	4064.634	3986.235	4057.888	4164.974	4083.764
52	4116	4035.568	4081.557	4088.983	4815.963	3947.566
53	4965	4691.41	4726.17	4752.797	4076.735	4336.143
54	4107	4066.373	4017.112	4084.208	4255.673	3965.936

55	4279	4117.361	4155.132	4209.089	4120.905	3911.084
56	4094	4016.875	4039.265	4092.575	4206.457	3794.582
57	4215	4042.7	4097.172	4095.406	4157.688	3908.366
58	4186	4118.51	4037.489	4080.898	4093.813	4065.37
59	4145	4102.408	4106.547	4113.591	4972.929	4082.909
60	4800	4799.534	4724.157	4736.912	4192.658	4799.025
61	4136	4052.499	4089.291	4103.621	4469.712	3962.34
62	4076	4258.641	4412.621	4290.748	4208.164	4639.635
63	3990	4049.28	4094.938	4088.784	4655.657	4204.188
64	4940	4728.138	4744.19	4761.641	4213.163	4392.785
65	4070	4045.637	4093.582	4089.073	4811.001	4045.201
66	4649	4801.82	4790.723	4867.404	4686.004	5256.291
67	4779	4781.684	4770.274	4683.824	4583.311	4784.909
68	4986	4650.216	4650.216	4739.245	4153.72	4313.925
69	4054	4065.606	4065.606	4107.689	4538.169	4080.467
70	4824	4682.915	4682.915	4716.384	5059.106	4549.048
71	4850	4768.677	4768.677	4926.224	4537.78	4628.889
72	4690	4684.671	4684.671	4718.517	4155.825	4672.858
73	4133	4032.872	4032.872	4080.157	4661.834	4011.72
74	4690	4749.306	4749.306	4747.847	4817.382	4916.411
75	4829	4791.919	4791.919	4870.004	5046.931	4788.564
76	5147	4769.741	4769.741	4919.378	4498.224	3686.534
77	4961	4722.068	4722.068	4672.329	4814.314	4063.417
78	4656	4730.52	4730.52	4697.278	4836.015	4804.625
79	4651	4796.167	4796.167	4636.158	4184.653	4910.082
80	4237	4066.976	4066.976	4075.188	4889.582	3860.824
81	4596	4802.329	4802.329	4671.246	4689.298	5094.403
82	4700	4672.778	4672.778	4755.382	4051.996	4617.753
83	4080	4016.28	4016.28	4082.915	4500.855	3951.338
84	4572	4670.515	4670.515	4681.691	4095.836	4858.981
85	4288	4031.44	4031.44	4122.065	4638.942	3891.582
86	4674	4744.041	4744.041	4734.915	4733.255	4866.931
87	4735	4706.406	4706.406	4729.778	3956.875	4658.307
88	3694	3938.425	3938.425	3840.747	4662.007	4441.463
89	4683	4742.77	4742.77	4731.029	4225.531	4871.709
90	4192	4135.59	4135.59	4199.023	4149.208	3968.454
91	4154	4059.946	4059.946	4117.139	4577.654	3865.276
92	4553	4615.747	4615.747	4560.024	4106.626	4633.608
93	4000	4046.611	4046.611	4135.785	3952.664	4105.358
94	3652	3933.734	3933.734	3930.127	4561.671	4461.094
95	4520	4636.289	4636.289	4833.73	4057.494	4897.21

96	3946	3994.734	3994.734	4068.873	4565.229	4010.747
97	4800	4758.437	4758.437	4791.6	4785.056	4657.745
98	4630	4639.218	4639.218	4644.704	4079.704	4641.238
99	4025	4016.377	4016.377	4081.809	4110.952	4004.11
100	4075	3988.709	3988.709	4066.776	4110.952	3928.874

Extrapolation All Models

Extrapolation Data Point	Experimental Value	100 data point ANN	1000 data point ANN	2.5k data point ANN	Regressed Theoretical Model	Hybrid Model
1	5213	4841.97	4730.171	4927.456	4700.8202	4727.293
2	4743	4448.41	4495.652	4634.42	4554.6711	4405.091
3	4467	4610.84	4695.617	4679.006	4530.4135	4627.072
4	4673	4776.31	4662.891	4672.068	4561.5239	4811.191
5	4750	4800.5	4672.538	4713.585	4705.3224	4845.91
6	4622	4642.05	4569.838	4689.693	4764.5798	4659.681
7	4710	4650.04	4607.995	4716.588	4550.6079	4620.304
8	4684	4836.26	4670.356	4696.621	4859.9559	4866.036
9	4500	4863.35	4727.372	4882.896	4581.2383	5016.825
10	4776	4812.02	4703.281	4706.584	4757.5534	4819.048
11	4857	5037.75	4739.59	4961.464	4553.8271	5192.888
12	4652	4787.35	4665.229	4692.026	4605.6735	4800.289
13	4620	4813.88	4705.742	4733.352	4759.7679	4886.864
14	4618	4689.82	4593.574	4712.09	4586.6022	4705.893
15	4750	4691.18	4708.649	4693.812	4673.7239	4672.676
16	4585	4479.69	4622.407	4621.734	4453.8294	4401.444
17	4520	4739.95	4704.861	4744.569	4488.5745	4893.138
18	4617	4773.89	4682.394	4758.356	4740.9029	4810.872
19	4697	4634.01	4589.318	4684.521	4699.5354	4604.841
20	4693	4430.78	4647.64	4705.044	4572.5501	4299.253
21	4753	4826.62	4698.829	4702.7	4543.8059	4855.181
22	4630	4659.57	4689.045	4727.532	4522.786	4660.323
23	4845	4775.04	4738.438	4782.231	4418.0595	4727.071
24	4674	4771.11	4643.117	4719.993	4609.0695	4857.398
25	4740	4749	4651.821	4739.186	4752.9123	4753.866
26	4551	4576.32	4693.854	4804.156	4557.8556	4586.581
27	4804	4814.56	4690.143	4702.491	4830.8556	4823.468

28	4815	4747.22	4735.763	4859.825	4543.0903	4687.867
29	4795	4811.7	4675.877	4682.712	4655.6268	4822.967
30	4541	4831.1	4696.03	4865.172	6161.7677	4974.714
31	6040	5769.89	4832.854	5950.715	4611.0396	5556.024
32	4455	4785.45	4706.856	4733.903	4553.4123	4801.75
33	4813	4627.29	4694.883	4736.025	4700.757	4536.481
34	4720	4421.55	4643.227	4727.197	4874.1972	4369.833
35	4980	4988.99	4753.932	4835.045	4719.7809	4993.885
36	4787	4470.33	4652.324	4801.477	4639.7294	4204.104
37	4610	4502.33	4601.104	4633.153	4522.4841	4478.272
38	4440	4648.61	4676.034	4696.107	4551.6066	4749.185
39	4419	4641.36	4694.189	4680.529	4555.3874	4701.017
40	4829	4784.91	4674.714	4706.493	4602.5172	4774.34
41	4760	4620.36	4730.51	4722.544	4821.7564	4496.125
42	4827	4744.85	4711.881	4745.007	4429.6188	4725.075
43	4486	4625.06	4687.715	4680.664	4849.8043	4724.595
44	4857	4884.84	4744.406	4886.852	4661.0184	4887.155
45	4647	4552.53	4626.983	4626.253	4647.5902	4528.954
46	4679	4834.91	4683.235	4785.048	4735.5379	4843.695
47	4919	4549.27	4570.541	4636.028	4542.4629	4248.015
48	4690	4813.91	4682.023	4684.933	4574.8335	4815.369
49	4837	4823.55	4683.728	4721.978	4876.9932	4822.716
50	4955	4938.21	4750.801	4902.104	4540.5022	4925.613
51	4735	4777.09	4671.792	4679.296	4446.6378	4812.697
52	4568	4782.43	4688.505	4699.172	4678.924	4915.249
53	4694	4609.33	4640.71	4646.836	4670.5568	4555.35
54	4547	4492.75	4638.488	4657.714	4647.0834	4491.791
55	4580	4472.54	4606.654	4635.017	4611.2032	4429.928
56	4816	4868.5	4694.832	4744.94	4506.1602	4885.611
57	4440	4757.63	4655.36	4661.717	4694.9328	4867.662
58	4624	4423.37	4645.028	4702.13	4728.2683	4391.154
59	4618	4480.39	4542.263	4670.907	4560.6094	4401.255
60	4793	4798.51	4665.726	4715.818	4651.7155	4801.291
61	4787	4697.92	4670.349	4712.464	4561.9441	4640.258
62	4790	4803.41	4696.172	4694.585	4531.8345	4807.571
63	4678	4792.37	4681.591	4682.541	4278.3198	4823.962
64	4120	4053.54	4128.729	4130.619	4555.4072	4050.189
65	4670	4786.95	4698.168	4687.245	4542.9123	4859.271
66	4726	4790.46	4688.708	4686.536	4834.5847	4815.283
67	4860	4904.18	4721.579	4789.138	4748.5472	4907.832
68	4639	4583.53	4587.568	4698.846	4539.3232	4544.928

69	4617	4791.29	4686.547	4685.164	4752.5988	4813.261
70	4634	4577.89	4576.272	4691.18	4555.0333	4556.006
71	4578	4825.93	4667.165	4709.264	4714.386	4978.31
72	4799	4453.73	4649.898	4780.136	4736.6867	4304.167
73	4668	4598.65	4590.249	4679.404	4590.0809	4591.278
74	4560	4713.6	4664.516	4719.265	4550.1447	4751.551
75	4688	4788.16	4693.171	4689.012	4701.6342	4798.566
76	4752	4419.02	4643.673	4730.668	4855.2794	4132.937
77	4968	4898.5	4746.46	4910.117	6134.6215	4856.988
78	6035	5753.12	4833.09	6021.122	4420.7948	5596.374
79	4556	4841.31	4669.768	4692.418	4730.9677	5085.366
80	4690	4741.23	4682.923	4791.844	4818.1002	4769.85
81	4712	4712.08	4634.41	4738.721	4805.4451	4712.14
82	4569	4810.12	4708.691	4812.506	4756.5259	4892.758
83	4676	4600.34	4605.018	4706.389	4836.9557	4566.494
84	4738	4701.84	4638.244	4729.159	4788.3993	4674.778
85	4918	4742.47	4694.213	4722.548	4572.3508	4727.88
86	4759	4779.4	4682.905	4716.697	4801.9944	4788.985
87	4594	4535.69	4652.389	4718.696	4720.0443	4524.614
88	4843	4469.79	4652.557	4802.368	4396.0047	4134.226
89	4555	4767.16	4657.648	4675.855	4589.0092	4947.331
90	4696	4734.83	4691.408	4712.33	4556.3832	4750.604
91	4738	4797.41	4690.824	4692.281	4816.4156	4837.557
92	4905	4493.84	4641.028	4746.177	4663.0575	4385.972
93	4640	4558.28	4743.188	4740.155	4678.3833	4518.279
94	4340	4625.34	4643.451	4638.938	4695.0245	4695.709
95	4662	4449.13	4644.381	4691.232	4584.4262	4289.769
96	4402	4757.38	4672.104	4722.01	4900.1345	4996.365
97	4793	4527.16	4692.215	4773.5	4579.4065	4356.461
98	4617	4782.95	4699.537	4708.463	4570.4681	4908.744
99	4745	4818.08	4695.161	4702.896	4712.9766	4850.802
100	4777	4437.44	4508.759	4642.69	4824.543	4332.661
101	4750	4565.58	4624.049	4709.411	4548.4589	4529.646
102	4695	4793.35	4682.322	4704.248	4641.8076	4856.063
103	4874	4717.85	4677.271	4722.501	4557.4551	4687.147
104	4712	4756.14	4687.205	4685.443	4664.2119	4785.22
105	4547	4486.48	4620.2	4647.104	4576.5729	4459.481
106	4770	4813.57	4699.807	4704.644	4489.8901	4850.63
107	4760	4769.23	4684.415	4762.85	4305	4773.477
108	4120	4005.79	4165.184	4145.412	4540.5843	3990.157
109	4711	4805.09	4679.475	4682.907	4616.6626	4831.794

110	4787	4635	4596.203	4672.147	4673.0655	4584.483
111	4747	4776.36	4694.18	4814.636	4591.8701	4801.505
112	4762	4702.5	4715.407	4730.396	4799.8687	4679.405
113	4765	4683.53	4719.816	4822.692	4679.6547	4659.871
114	4791	4812.93	4700.283	4818.456	4448.0416	4825.451
115	4692	4760.93	4657.435	4735.281	4716.6856	4791.763
116	4926	5017.04	4728.631	4940.251	4299.1749	5093.094
117	4254	4021.1	4155.557	4143.148	4844.4949	3846.771
118	4835	4988.99	4741.07	4886.952	6194.7954	5088.365
119	5855	5791.34	4834.318	5892.852	3913.3106	5787.056
120	3650	3712.03	3915.99	3815.596	4791.2262	3756.531
121	4715	4739.89	4705.264	4741.063	4629.4321	4745.429
122	4631	4734.32	4667.262	4674.608	4558.9439	4823.328
123	4693	4829.19	4689.473	4701.49	4549.256	4943.347
124	4680	4660.78	4693.437	4681.374	4479.5335	4656.177
125	4641	4765.51	4674.081	4747.602	4380.5944	4809.732
126	4599	4763.86	4669.696	4693.214	4416.7334	4906.68
127	4667	4863.28	4668.231	4702.92	4506.9499	4986.254
128	4506	4719.2	4656.061	4662.149	4718.8549	4750.307
129	4991	4902.61	4713.516	4794.632	4585.4319	4886.612
130	4782	4773.64	4679.297	4718.688	4365.156	4767.052
131	4519	4568.23	4503.229	4581.21	4558.885	4610.385
132	4671	4833.07	4689.058	4701.828	4749.9336	4849.625
133	4700	4739.49	4700.811	4762.265	4646.3239	4741.256
134	4499	4508.9	4615.32	4643.687	4646.3239	4511.484

Interpolation Data points:

Interpolation Data Point	exDryFeed	exclinker	expozzolane	exGypsum	exLimestone	exflyash	exSepSpeed
1	70.35458	0.940245	0	0.037752	0.017	0	196.099
2	67.54532	0.939	0	0.025	0.031	0	200.1142
3	73.7541	0.935196	0	0.035804	0.024	0	195.0136
4	82.72781	0.68111	0.088385	0.019	0.11	0.073539	165.5075
5	74.05458	0.781771	0.096256	0.032	0.062	0	181.3593
6	65.15137	0.953511	0	0.028649	0.013018	0	192.4416
7	66.48389	0.949	0	0.037	0.007	0	201.934
8	74.38338	0.641114	0.185327	0.021559	0.124	0	161.431
9	79.28583	0.963	0	0.015	0.007	0	160.8174
10	65.5704	0.9335	0	0.0335	0.028	0	200.6673

11	68.73856	0.620955	0.111045	0.025	0.132	0.083	150.5536
12	61.81704	0.948407	0	0.048598	0	0	205.6382
13	69.57374	0.789889	0.112156	0.03	0.04	0	187.4622
14	75.39652	0.778	0.104	0.025	0.065	0	184.2641
15	63.70452	0.658148	0.163	0.030853	0.122	0	188.2059
16	72.15462	0.938013	0	0.034479	0.0225	0	185.5189
17	71.73754	0.935	0	0.0365	0.0285	0	198.5441
18	68.23547	0.776091	0.10414	0.0338	0.057718	0	188.0746
19	64.26099	0.941346	0	0.047633	0.011	0	196.5359
20	77.76649	0.673422	0.112578	0.035	0.081	0.098	170.9427
21	77.8104	0.6403	0.1687	0.0192	0.1334	0.0102	152.6395
22	72.34856	0.684203	0.135	0.027797	0.125	0	154.9293
23	61.96885	0.948966	0	0.031041	0.015	0	202.6533
24	61.91137	0.949107	0	0.030893	0.015	0	202.347
25	66.72426	0.943317	0	0.03518	0.0215	0	190.1116
26	77.50075	0.67662	0.154176	0.021204	0.12	0	156.3879
27	76.1161	0.929143	0	0.035857	0.035	0	183.6021
28	75.69955	0.928861	0	0.037137	0.034	0	166.2705
29	81.56668	0.62807	0.184571	0.020367	0.139	0	163.9349
30	61.07983	0.796601	0.088838	0.028603	0.058	0	203.6202
31	68.53737	0.937	0	0.032	0.026	0	198.7672
32	71.25412	0.950108	0	0.030892	0.014	0	185.666
33	72.05791	0.634658	0.226944	0.017	0.098367	0	189.397
34	66.41449	0.94	0	0.034	0.021	0	196.2645
35	65.78384	0.813472	0.1	0.023522	0.035	0	190.181
36	72.79366	0.930152	0	0.033848	0.031	0	189.1728
37	66.31236	0.955	0	0.028	0.017	0	200.0421
38	66.93684	0.945524	0	0.037477	0.007	0	201.4968
39	65.25285	0.93895	0	0.025051	0.031	0	200.9551
40	68.67735	0.933184	0	0.034316	0.0275	0	201.1875
41	76.40751	0.59	0.16	0.02	0.14	0.09	164.4059
42	69.51991	0.937312	0	0.035248	0.02742	0	199.817
43	71.85719	0.640772	0.171228	0.03	0.132	0	177.3668
44	74.06062	0.959019	0	0.028	0.005983	0	188.5034
45	70.56494	0.932549	0	0.034951	0.0275	0	201.2797
46	62.4911	0.94156	0	0.03694	0.0165	0	188.1316
47	66.44649	0.94	0	0.025	0.03	0	196.7049
48	69.49769	0.935798	0	0.03319	0.031	0	189.1728
49	74.42603	0.96	0	0.028	0.005	0	189.8732
50	69.24713	0.947	0	0.034	0.019	0	189.7844
51	74.3555	0.947225	0	0.032783	0.02	0	186.9385
52	65.80112	0.94	0	0.034	0.021	0	193.907
53	73.92323	0.676407	0.102	0.035	0.08965	0.096949	171.6554
54	71.17149	0.939589	0	0.032144	0.026	0	186.4643

55	63.57346	0.944843	0	0.045152	0.007	0	205.1225
56	71.77355	0.930182	0	0.036318	0.0285	0	189.396
57	66.44656	0.944	0	0.039	0.007	0	200.106
58	71.49092	0.928638	0	0.032353	0.036	0	196.8501
59	61.82314	0.954758	0	0.038253	0	0	182.1124
60	74.69891	0.649	0.105	0.021	0.112	0.085	182.9359
61	67.09685	0.928	0	0.035	0.032	0	195.5195
62	77.61058	0.775006	0.058367	0.020124	0.079703	0.048639	176.2402
63	62.2732	0.95177	0	0.02923	0.014	0	202.3274
64	76.78534	0.661427	0.166892	0.020694	0.123	0	151.4816
65	67.11461	0.931371	0	0.036129	0.0275	0	199.4367
66	74.03257	0.614775	0.194225	0.025	0.138	0	158.9049
67	69.47485	0.668946	0.155501	0.030025	0.136567	0	180.4627
68	65.72302	0.780868	0.100469	0.022663	0.068	0	192.7707
69	69.06261	0.927	0	0.035	0.033	0	191.0322
70	74.31065	0.745	0.123	0.034	0.07	0	174.3164
71	69.07793	0.639	0.126	0.023	0.111	0.075	188.1874
72	73.82133	0.745014	0.120552	0.03645	0.07	0	172.0813
73	71.66965	0.929316	0	0.031684	0.034	0	196.2198
74	76.99338	0.668821	0.159182	0.03	0.114	0	164.7034
75	72.81143	0.616	0.193	0.025	0.138	0	159.169
76	68.99976	0.634	0.128	0.022	0.112	0.078	182.4047
77	73.15686	0.701752	0.142755	0.025483	0.13	0	170.0483
78	76.52837	0.673	0.112	0.035	0.082	0.098	171.0997
79	71.88477	0.648	0.212356	0.0142	0.102444	0	188.1316
80	65.5803	0.94885	0	0.030152	0.016	0	201.017
81	72.07568	0.64	0.218	0.017	0.102	0	192.0724
82	71.61515	0.668544	0.082313	0.025781	0.154	0.069399	153.6014
83	69.96231	0.948431	0	0.032564	0.014	0	182.4264
84	64.20174	0.811905	0.113161	0.026	0.049	0	200.3253
85	73.10482	0.947	0	0.042	0.008	0	193.3378
86	76.57046	0.6775	0.16	0.028	0.1065	0	160.2069
87	67.91167	0.672228	0.097272	0.025	0.138	0.0675	143.376
88	80.58126	0.922663	0	0.029338	0.048	0	162.5824
89	83.91612	0.644736	0.169294	0.032	0.126	0	148.3224
90	65.13172	0.941439	0	0.044565	0.011	0	201.3889
91	69.61143	0.944	0	0.039	0.007	0	194.8997
92	82.58309	0.705839	0.099546	0.023944	0.095	0.075673	165.6703
93	73.8394	0.947077	0	0.047923	0	0	194.5712
94	80.8175	0.929853	0	0.028147	0.042	0	169.4658
95	64.55804	0.8	0.09	0.03	0.052	0	192.6685
96	73.22974	0.948774	0	0.032226	0.014	0	188.8902
97	72.09898	0.680044	0.159553	0.030412	0.13	0	166.4017
98	60.38839	0.794508	0.065	0.029	0.060492	0.025	211.2064

99	72.52365	0.931932	0	0.033071	0.035	0	186.9095
100	75.19511	0.930505	0	0.027528	0.037	0	194.6022

Extrapolation Data Points:

Extrapolation Data Points	exDryFeed	exlinker	expozzolane	exGypsum	exLimestone	exflyash	exSepSpeed
1	57.00257	0.770723	0.10924	0.026021	0.068	0	203.2229
2	90.91341	0.670133	0.073489	0.02	0.118356	0.09	150.4513
3	86.25383	0.6795	0.155	0.03	0.1075	0	151.8392
4	89.09739	0.672223	0.146589	0.027189	0.126	0	149.8842
5	88.71505	0.657463	0.154537	0.02	0.14	0	143.4583
6	90.0309	0.667936	0.09	0.025298	0.1105	0.078291	152.6144
7	90.46218	0.648619	0.096907	0.023461	0.118	0.085	154.3467
8	88.03474	0.661447	0.146711	0.023833	0.14	0	149.8842
9	55.15532	0.772	0.096	0.028	0.078	0	214.9252
10	87.21162	0.657273	0.159225	0.025497	0.13	0	152.3128
11	56.19532	0.770952	0.107595	0.031463	0.09	0	213.6742
12	87.09347	0.664887	0.141035	0.026078	0.14	0	147.3555
13	86.78094	0.652767	0.165608	0.021626	0.132	0	141.8964
14	93.549	0.647838	0.099018	0.025733	0.112	0.087419	149.2215
15	87.8629	0.656735	0.159746	0.029512	0.126	0	153.5726
16	59.16208	0.818	0.065	0.029	0.063	0.025	213.9583
17	87.80708	0.654164	0.173434	0.016487	0.155956	0	152.6772
18	85.70348	0.666281	0.160939	0.019787	0.153	0	132.183
19	91.41975	0.656519	0.09523	0.024107	0.111103	0.085	154.3467
20	55.56627	0.818389	0.064808	0.029	0.063	0.024808	213.9583
21	87.84034	0.658142	0.158858	0.025	0.13	0	153.101
22	90.98583	0.656813	0.176	0.013171	0.126	0	148.6384
23	86.55616	0.630154	0.186815	0.017032	0.166	0	151.6818
24	88.78657	0.675473	0.15258	0.018947	0.153	0	137.7921
25	59.38036	0.811975	0.082025	0.03	0.076	0	211.2426
26	53.68286	0.803433	0.091533	0.02	0.057	0	210.3813
27	88.65697	0.659553	0.161342	0.021106	0.13	0	151.2132
28	52.57783	0.785722	0.1043	0.024956	0.057	0	211.6713
29	87.3978	0.669211	0.147894	0.025	0.13	0	154.4435
30	56.80663	0.798334	0.091988	0.029871	0.079878	0	210.5401
31	55.09034	0.475808	0.180139	0.0235	0.167731	0.122817	218.1233
32	86.63463	0.654962	0.166899	0.022152	0.128	0	139.6918
33	89.20051	0.658	0.176	0.012	0.126	0	148.6384
34	55.45591	0.817047	0.060189	0.031	0.067778	0.024	213.9583
35	56.12442	0.762885	0.12	0.027115	0.064	0	212.9914

36	55.34791	0.807	0.06	0.031	0.078	0.024	213.9583
37	89.49072	0.674663	0.101835	0.022489	0.102	0.099	152.1898
38	87.54829	0.676726	0.161482	0.015804	0.118	0	153.2365
39	86.40282	0.680495	0.156695	0.028794	0.106	0	150.5536
40	87.02086	0.661474	0.150524	0.02	0.14	0	148.548
41	85.16158	0.649456	0.166	0.03	0.133	0	151.38
42	55.44839	0.793081	0.099758	0.022161	0.059	0	216.487
43	85.54021	0.684274	0.152754	0.03	0.133	0	151.8506
44	53.71865	0.778161	0.108	0.028833	0.057	0	211.6713
45	85.82748	0.678	0.1	0.025	0.1	0.097	153.9401
46	59.09386	0.800918	0.092055	0.029961	0.0765	0	211.8167
47	88.82956	0.67	0.0855	0.024	0.104	0.088472	154.3127
48	91.84681	0.661811	0.161197	0.027	0.122	0	149.8842
49	90.62482	0.65189	0.164342	0.020767	0.135	0	140.8849
50	53.98211	0.768443	0.111366	0.028192	0.066	0	213.3633
51	88.69794	0.669785	0.149215	0.027	0.126	0	149.8842
52	85.29026	0.668	0.15	0.026	0.156	0	154.1319
53	88.75328	0.666	0.109096	0.025904	0.1	0.099	152.1898
54	88.66737	0.666	0.111717	0.021283	0.102	0.099	154.7186
55	87.71636	0.676935	0.1	0.022065	0.102	0.099	152.1898
56	89.91737	0.640009	0.164061	0.021864	0.146064	0	138.4646
57	89.09211	0.685	0.15	0.025	0.112	0	149.9109
58	55.39511	0.82	0.064	0.029	0.063	0.024	213.9583
59	89.477	0.665591	0.080738	0.020789	0.116	0.088783	150.4441
60	91.73026	0.655972	0.160641	0.020386	0.135	0	138.2082
61	56.73178	0.819529	0.085652	0.028819	0.066	0	215.1483
62	86.28826	0.668333	0.158667	0.023	0.122	0	152.5664
63	89.69033	0.672	0.162	0.023	0.115	0	151.5205
64	59.45882	0.952	0	0.028	0.02	0	210.4627
65	86.52531	0.672392	0.161611	0.023	0.115	0	154.0306
66	88.33012	0.672	0.162	0.023	0.115	0	151.5205
67	57.51464	0.778	0.1	0.029	0.067	0	214.7029
68	92.19764	0.650574	0.096604	0.021814	0.116	0.087	153.3003
69	88.76234	0.672	0.162	0.023	0.115	0	151.6339
70	90.51418	0.658913	0.09	0.023614	0.1105	0.089012	148.7985
71	93.71866	0.653541	0.164253	0.022205	0.132	0	138.9294
72	55.3079	0.810139	0.06	0.031	0.074861	0.024	213.9583
73	91.67625	0.657994	0.097631	0.023375	0.108	0.085	154.3467
74	86.8828	0.667728	0.150418	0.021855	0.132	0	132.4805
75	87.44213	0.672	0.162	0.023	0.115	0	151.5019
76	55.33466	0.817	0.06	0.031	0.068	0.024	213.9583
77	53.66001	0.777	0.108	0.03	0.057	0	211.6713
78	52.49889	0.480744	0.1767	0.0235	0.173	0.115542	218.1233
79	88.18484	0.668714	0.15002	0.02526	0.156	0	152.1135

80	56.88902	0.7966	0.083917	0.028	0.076	0	213.2889
81	93.86282	0.633422	0.109417	0.026	0.110678	0.092392	147.9691
82	56.05104	0.789427	0.088657	0.031916	0.064	0	213.2703
83	90.04737	0.653718	0.097227	0.022755	0.113306	0.085	154.3467
84	92.03128	0.63371	0.105	0.026	0.112	0.09529	147.9691
85	56.74141	0.798096	0.09213	0.024806	0.059	0	215.1875
86	85.90741	0.659967	0.152023	0.02	0.14	0	145.9949
87	58.80793	0.792	0.065	0.029	0.063	0.025	211.2064
88	55.31303	0.807	0.06	0.031	0.078	0.024	213.9583
89	85.30167	0.696192	0.146808	0.025	0.132	0	149.445
90	85.66254	0.658629	0.148898	0.026474	0.138	0	145.7192
91	90.48179	0.661	0.162033	0.026967	0.122	0	149.525
92	85.49956	0.655464	0.102549	0.022	0.104	0.088	143.8072
93	85.75456	0.64	0.174	0.032	0.126	0	147.0714
94	89.1489	0.666	0.110344	0.027	0.098	0.098656	152.6766
95	56.4517	0.818	0.064	0.031	0.063	0.024	213.9583
96	89.57497	0.660592	0.159811	0.021197	0.13035	0	134.1167
97	85.55984	0.62885	0.11572	0.020605	0.1105	0.096333	152.2982
98	85.51964	0.666281	0.159331	0.023361	0.123	0	146.5983
99	89.03606	0.656567	0.159346	0.02613	0.13	0	150.2003
100	88.35505	0.672	0.07	0.02	0.12	0.09	151.818
101	90.13284	0.642421	0.099162	0.022446	0.1105	0.097436	149.3665
102	90.12653	0.659	0.163	0.02	0.13	0	148.6486
103	57.25376	0.815439	0.093703	0.024957	0.066	0	213.8488
104	89.32631	0.662519	0.155181	0.028213	0.126	0	151.0257
105	86.18191	0.676089	0.1	0.022911	0.102	0.099	151.0098
106	87.78832	0.657484	0.158776	0.025724	0.13	0	151.6667
107	85.72338	0.665338	0.162891	0.018769	0.153	0	132.183
108	56.78875	0.948	0	0.028	0.024	0	210.1652
109	91.17514	0.664317	0.158708	0.027	0.122	0	149.8842
110	89.48641	0.676	0.1	0.026	0.108	0.09	150.4386
111	56.5582	0.801533	0.092483	0.028	0.078	0	213.2889
112	87.28344	0.657309	0.18	0.016686	0.118	0	144.6542
113	53.66317	0.791922	0.101533	0.021539	0.057	0	211.6713
114	56.98133	0.798	0.096	0.028	0.078	0	213.2889
115	86.23006	0.67542	0.152072	0.019509	0.153	0	135.0877
116	57.09338	0.774845	0.101386	0.033758	0.09	0	210.8618
117	57.60185	0.948	0	0.028	0.024	0	210.1652
118	56.79757	0.763651	0.108658	0.028842	0.081211	0	214.9252
119	57.26222	0.458486	0.193072	0.0235	0.166	0.128964	214.0992
120	85.4882	0.93179	0	0.03721	0.031	0	153.3073
121	56.56429	0.793198	0.1	0.021803	0.059	0	214.2756
122	58.55448	0.820309	0.09014	0.028917	0.060711	0	213.9752
123	90.71915	0.658767	0.164	0.025	0.124233	0	147.1324

124	86.99166	0.679524	0.157963	0.028512	0.106	0	150.5536
125	85.37534	0.670463	0.155832	0.020729	0.153	0	132.4499
126	93.48235	0.67853	0.176888	0.019602	0.125	0	147.5321
127	89.54845	0.665767	0.155105	0.023066	0.156	0	150.1817
128	86.32813	0.691505	0.147261	0.022234	0.111	0	150.4858
129	59.12464	0.784431	0.10273	0.02915	0.077213	0.005533	213.5998
130	85.89561	0.663	0.15	0.023	0.136	0	139.6205
131	88.43404	0.731293	0.115	0.024047	0.109293	0	146.0964
132	90.89664	0.658	0.164	0.025	0.125	0	147.1324
133	57.48363	0.792264	0.1	0.022739	0.059	0	210.1197
134	90.72289	0.66847	0.108869	0.021679	0.102	0.099	153.9108