

Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης
Τομέας Επιχειρησιακής Έρευνας



Ανάπτυξη αλγορίθμου τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος για την
επίλυση
του προβλήματος προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής
(**permutation flowshop scheduling problem**) (PFSP)

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την
Απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος

Ραπανάκη Εμμανουέλα

Χανιά,
Νοέμβριος, 2012

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στη σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, με σκοπό την απόκτηση του μεταπτυχιακού διπλώματος στην Επιχειρησιακή Έρευνα. Η εκκίνηση της μεταπτυχιακής εργασίας τοποθετείται χρονικά τον Αύγουστο του 2011 και η ολοκλήρωση της τον Νοέμβριο του 2012.

Το αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας αφορά την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής με χρήση του αλγορίθμου του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Μαρινάκη για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του κατά την υλοποίηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για την ενασχόληση τους με το κείμενο της διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την αγάπη σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου διαδρομής.

Εμμανουέλα Ραπανάκη

Νοέμβριος 2012

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	6
Οργάνωση της εργασίας.....	7
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 2. Φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Όργανα του ανοσοποιητικού συστήματος.....	14
2.3 Έμφυτη και επίκτητη ανοσοποίηση	14
2.4 Συστατικά του ανοσοποιητικού συστήματος.....	15
2.5 Ο τρόπος δράσης του ανοσοποιητικού συστήματος στον οργανισμό μας.....	16
2.6 Σωματική υπέρ-μετάλλαξη	18
2.7Αντιγόνα και αντισώματα	18
2.8 Λευκά κύτταρα	20
2.9 Λεμφοκύτταρα	20
2.10 Μνήμη του ανοσοποιητικού συστήματος.....	22
2.11Μοντέλα του Φυσικού Ανοσοποιητικού Συστήματος.....	22
Κεφάλαιο 3. Το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Μοντέλα του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος	26
3.3 Αλγόριθμος για το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα	26
3.4Κλασική άποψη για τα μοντέλα των AIS.....	28
3.4.1 Αρνητική επιλογή	28
3.4.2 Εξελικτικές προσεγγίσεις.....	30

3.5 Αλγόριθμος επέκτασης κλώνων και επιλογής.....	30
3.6 Μοντέλα βασισμένα στην επιλογή κλώνων.....	32
3.6.1 CLONALG.....	32
3.6.2 Δυναμική επιλογή κλώνων.....	34
3.6.3 Πολύ-επίπεδο AIS.....	35
 Κεφάλαιο 4. Το πρόβλημα προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής (permutation flowshop scheduling problem) (PFSP)	38
4.1 Εισαγωγή.....	38
4.2 Πολυκριτήρια προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης (MOPs) ..	38
4.3 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο πρόβλημα συνεχούς ροής PFSR.....	39
4.4 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο γενικό πρόβλημα συνεχούς ροής (flowshop) (n/m/Cmax)	42
4.5 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο πρόβλημα συνεχούς ροής μη αναμονής με δύο μηχανές.....	45
4.6 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο πρόβλημα ροής (permutation flowshop sequencing problem) (PFSP).....	47
4.7 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο πρόβλημα προγραμματισμού ροής (permutation flowshop scheduling problem)	49
 Κεφάλαιο 5. Περιγραφή του προβλήματος που θα επιλυθεί.....	51
5.1 Επίλυση του προβλήματος με εφαρμογή του αλγορίθμου τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος	52
5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου	55
 Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα.....	64
Βιβλιογραφία.....	65

Περίληψη

Ο όρος «χρονοπρογραμματισμός» έχει ορισθεί από τον Baker το 1974 ως «...η κατανομή δεδομένων πόρων στη διάρκεια του χρόνου με σκοπό την ολοκλήρωση ενός συνόλου εργασιών». Το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού συνδυάζει επιστημονικές περιοχές τόσο διαφορετικές, όπως είναι αυτές του σχεδιασμού παραγωγής (production planning), του computer design και της παραγωγής πλάνων (timetabling).

Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής είναι ένα από τα πιο πολύπλοκα συνδυαστικά προβλήματα που έχουν ποτέ διατυπωθεί. Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα θέματα που αφορούν ένα σύστημα παραγωγής και καθορίζει τη λειτουργικότητα και την απόδοσή του. Ο χρονικός προγραμματισμός παραγωγής θέτει το πρόβλημα του προγραμματισμού σε βραχυπρόθεσμη βάση των διατιθέμενων πόρων (ανθρώπινο δυναμικό, μηχανολογικός εξοπλισμός, οικονομικοί πόροι).

Ο προγραμματισμός συνεχούς ροής έχει ένα πολύ δραστήριο και παραγωγικό χώρο έρευνας, όπως παρουσιάστηκε στην εργασία του Johnson (1954). Στο πρόβλημα συνεχούς ροής (FSP) μια σειρά N από n εργασίες, οι οποίες δεν έχουν σχέση μεταξύ τους, πρέπει να μεταποιηθούν σε ένα σύνολο M από m μηχανές. Οι μηχανές αυτές διατίθενται σε σειρά και η κάθε εργασία πρέπει να επισκέπτεται όλες τις μηχανές με την ίδια σειρά. Αυτή η σειρά μπορεί να είναι, χωρίς βλάβη της γενικότητας, από $1, \dots, m$. Ως εκ τούτου, κάθε εργασία j , $j \in N$ αποτελείται από m δραστηριότητες. Οι χρόνοι επεξεργασίας των εργασιών στις μηχανές είναι γνωστοί εκ των προτέρων, μη-αρνητικοί και ντετερμινιστικοί. Συμβολίζονται ως $P_{j,i}$, $j \in N$, $i \in M$. Για το πρόβλημα FSP είναι απαραίτητο να ληφθούν μια σειρά από υποθέσεις, οι οποίες δημιουργήθηκαν από τον Baker (1974) [1]:

- Όλες οι εργασίες είναι ανεξάρτητες και διαθέσιμες για επεξεργασία σε χρόνο 0.
- Οι μηχανές είναι συνεχώς διαθέσιμες (δεν υπάρχουν βλάβες).
- Κάθε μηχανή μπορεί να επεξεργαστεί μόνο μία εργασία τη φορά.
- Κάθε εργασία μπορεί να γίνεται μόνο σε μία μηχανή τη φορά.
- Όταν η επεξεργασία μιας συγκεκριμένης εργασίας έχει ξεκινήσει σε μία συγκεκριμένη μηχανή, η επεξεργασία αυτή δεν μπορεί να διακοπεί και συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας (χωρίς προτίμηση).
- Οι χρόνοι εγκατάστασης είναι ανεξάρτητη ακολουθία και περιλαμβάνονται στους χρόνους επεξεργασίας, ή αγνοούνται.
- Επιτρέπεται η άπειρη υπό επεξεργασία αποθήκευση.

Ο στόχος είναι να επιτευχθεί μια σειρά παραγωγής από N εργασίες στις M μηχανές, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί ένα συγκεκριμένο κριτήριο. Μια σειρά παραγωγής

κανονικά ορίζεται για κάθε μηχανή. Δεδομένου ότι υπάρχουν $n!$ πιθανές παραλλαγές εργασιών ανά μηχανή, ο συνολικός αριθμός των πιθανών σειρών είναι $(n!)^m$. Ωστόσο, μια κοινή απλοποίηση στη βιβλιογραφία είναι να υποθέσουμε ότι η ίδια μετάθεση εργασιών διατηρείται σε όλες τις μηχανές. Κάτι τέτοιο, απαγορεύει αποτελεσματικά το πέρασμα των εργασιών μεταξύ των μηχανών και μειώνει το χώρο λύσεων σε $n!$. Με αυτή την απλοποίηση, το πρόβλημα αυτό αναφέρεται ως πρόβλημα προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής ή σε σύντομία PFSP.

Λαμβάνοντας υπόψη τη φύση του προβλήματος, οι ακριβείς μέθοδοι είναι ικανές να λύσουν μόνο τις μικρές εκδοχές του προβλήματος και επομένως δεν μπορούν να εφαρμοστούν στις πραγματικές καταστάσεις, που διαχειρίζονται έναν μεγάλο αριθμό εργασιών και μηχανών. Οι ευρετικές μέθοδοι αποτελούν αξιόπιστη και αποδοτική προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος PFSP, δεδομένου ότι είναι σε θέση να παρέχουν, κατά προσέγγιση, υψηλής ποιότητας λύσεις σε έναν λογικό χρόνο.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής με χρήση του αλγορίθμου του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τις βέλτιστες λύσεις, οι οποίες βρέθηκαν από την βιβλιογραφία.

Οργάνωση της εργασίας

Η δομή της εργασίας παρουσιάζεται παρακάτω:

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στο πρόβλημα προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής (**permutation flowshop scheduling problem**) (PFSP). Αρχικά, παρουσιάζονται τα συστήματα παραγωγής και οι παράμετροι που αφορούν τα συστήματα αυτά. Στη συνέχεια, αναφερόμαστε στο χρονοπρογραμματισμό του συστήματος παραγωγής (flowshop) αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του. Τέλος, αναφέρονται οι υποθέσεις της επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος, καθώς και γίνεται μια αναφορά των γενετικών αλγορίθμων.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργίες και τα συστατικά μέρη του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος, ενώ στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα και οι αλγόριθμοι που προκύπτουν από την εφαρμογή των εννοιών του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια ιστορική αναδρομή προβλημάτων συνεχούς ροής (flowshop), καθώς και του προβλήματος προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής (**permutation flowshop scheduling problem**) (PFSP), το οποίο θα επιλυθεί στην παρούσα εργασία.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται το πρόβλημα που θα επιλυθεί, καθώς και αναλύονται εκτενώς τα επιμέρους βήματα του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε. Στο τέλος του

κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του στο σύνολο των δεδομένων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις σχετικά με τον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε και την περαιτέρω εργασία.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται αυξανόμενη χρήση πακέτων βελτιστοποίησης, που στηρίζονται σε Εφαρμογές Επιχειρησιακής Έρευνας και στον Μαθηματικό Προγραμματισμό. Ο λόγος της αύξησης αυτής οφείλεται στην αποτελεσματική διαχείριση της παροχής αγαθών και υπηρεσιών στα συστήματα παραγωγής.

Η επιτυχία της χρήσης τεχνικών Επιχειρησιακής Έρευνας οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων τόσο στον τομέα του υλικού όσο και στον τομέα του λογισμικού, αλλά και στην αυξανόμενη ενσωμάτωση συστημάτων πληροφόρησης στις διαδικασίες τόσο της παραγωγής όσο και της πώλησης. Επίσης, ένας άλλος παράγοντας είναι η ανάπτυξη μοντέλων και αλγορίθμων, κυρίως τα τελευταία χρόνια. Τέλος, τα προτεινόμενα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τους όλα τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων που προκύπτουν σε πραγματικές εφαρμογές, ενώ οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι και υπολογιστικές υλοποιήσεις βρίσκουν ικανοποιητικές λύσεις σε αποδεκτούς υπολογιστικούς χρόνους.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος για την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής (**permutation flowshop scheduling problem**) (PFSP). Για την υλοποίηση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος επιλογής κλώνων. Πριν καταλήξουμε στη συγκεκριμένη εφαρμογή, αναλύονται διεξοδικά τόσο η περιοχή του προγραμματισμού παραγωγής όσο και του αλγορίθμου επιλογής κλώνων.

Όσο αναφορά τον προγραμματισμό παραγωγής, παρακάτω γίνεται μία εκτεταμένη αναφορά στους τύπους συστημάτων παραγωγής και στα διάφορα θέματα (παραμέτρους) που έχουν να κάνουν με τη λειτουργία και το σχεδιασμό τους.

Τα συστήματα παραγωγής μπορούν να διακριθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

α) **Συστήματα συνεχούς ροής (flow-shop)**, όπου η παραγωγή εξειδικεύεται σε ένα περιορισμένο αριθμό τυποποιημένων προϊόντων, που παράγονται σε αντίστοιχες γραμμές παραγωγής και προορίζονται για ευρεία κατανάλωση. Στα συστήματα αυτά η ροή του προϊόντος σε κάθε γραμμή είναι ίδια για κάθε κομμάτι. Ο παραγωγικός εξοπλισμός οργανώνεται χωροταξικά σε γραμμική διάταξη και είναι ειδικής χρήσης, με μεγάλο βαθμό αυτοματοποίησης. Στην κατηγορία αυτή ανήκει και η περίπτωση όπου το σύστημα συμπεριφέρεται σαν μία μηχανή, όπου οι εισροές μετασχηματίζονται σε ένα ή περισσότερα προϊόντα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ένα διυλιστήριο ή μία μονάδα παραγωγής τσιμέντου.

β) **Συστήματα παραγωγής κατά παραγγελία (job-shop)**, τα οποία παράγουν μεγάλη ποικιλία προϊόντων σε μικρές ποσότητες και με προδιαγραφές που ορίζονται από τον πελάτη, ο οποίος αναθέτει στο σύστημα την παραγωγή ενός αριθμού ίδιων προϊόντων (παραγγελία ή εργασία). Η ροή του προϊόντος στα συστήματα αυτά είναι

διαφορετική για κάθε παραγγελία (παρτίδα παραγωγής). Η χωροταξική διάταξη είναι λειτουργική, δηλαδή ο παραγωγικός εξοπλισμός, που είναι γενικής χρήσης με γενικά περιορισμένο βαθμό αυτοματοποίησης, διατάσσεται σε ομάδες παραγωγικών μονάδων που εκτελούν την ίδια λειτουργία (π.χ. χωριστά οι τόρνοι, χωριστά οι πρέσες κ.ο.κ.)

γ) **Συστήματα κατασκευής έργων**, που παράγουν συνήθως ένα προϊόν μεγάλου μεγέθους και αξίας που προορίζεται για ένα πελάτη. Στα συστήματα αυτά ο παραγωγικός εξοπλισμός, που χαρακτηρίζεται από μικρό βαθμό αυτοματοποίησης, διατάσσεται γύρω από το προϊόν.

Εκτός από τις παραπάνω βασικές κατηγορίες, μπορούμε να διακρίνουμε τα συστήματα με κύτταρα παραγωγής (production cells), στα οποία συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα των δύο πρώτων κατηγοριών. Η παραγωγή στα συστήματα αυτά πραγματοποιείται σε «κύτταρα», όπου παράγονται τα προϊόντα ομαδοποιημένα ανάλογα με τις ανάγκες τους σε πρώτες και βοηθητικές ύλες, σε μηχανές και ιδιοσυσκευές και σε εξειδικευμένο προσωπικό, καθώς και ανάλογα με τις διαδικασίες προετοιμασίας και ρύθμισης μηχανών και τη σειρά των απαιτούμενων επεξεργασιών.

Τέλος, μια ενδιάμεση κατηγορία συστημάτων είναι τα συστήματα παραγωγής σε παρτίδες (batch-shop), που έχουν χαρακτηριστικά συστημάτων τόσο συνεχούς ροής όσο και παραγωγής κατά παραγγελία. Τα συστήματα αυτά συναντώνται συχνά στην πράξη και αφορούν παραγωγή αποθηκεύσιμων προϊόντων, που παράγονται με κοινό παραγωγικό εξοπλισμό, όπως για παράδειγμα βιομηχανίες ποτών ή επίπλων. Για τη μείωση των αποθεμάτων, η ετήσια ποσότητα που πρέπει να παραχθεί από κάθε προϊόν διαιρείται σε παρτίδες, οι οποίες διαδέχονται η μία την άλλη, σε έναν κύκλο που επαναλαμβάνεται αρκετές φορές στη διάρκεια του έτους.

Οι παράμετροι που αφορούν τα διάφορα συστήματα παραγωγής και καθορίζουν τη λειτουργικότητα και την απόδοσή τους είναι:

α) **οι προβλέψεις** των οποίων η σημασία στην πράξη είναι μεγάλη, αφού κάθε σπουδαία απόφαση στις επιχειρήσεις, στρατηγικού ή τακτικού χαρακτήρα, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε αυτές. Οι προβλέψεις χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση των προγραμμάτων παραγωγής, προμήθειας πρώτων υλών, απασχόλησης ανθρώπινου δυναμικού κλπ.

β) **τα αποθέματα** για τα οποία έχει αναπτυχθεί η Θεωρία Αποθεμάτων, που εξετάζει συστηματικά τα σχετικά προβλήματα που συνδέονται με τη δημιουργία και τη διαχείριση των αποθεμάτων. Η διαχείριση των αποθεμάτων πρώτων υλών, ενδιάμεσων και τελικών προϊόντων, αποτελεί σημαντική λειτουργία γιατί αφενός κοστίζει, αφετέρου αποσυνδέει το παραγωγικό σύστημα από τις διακυμάνσεις της ζήτησης.

γ) **τα συστήματα προγραμματισμού απαιτούμενων υλικών** που αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία συστημάτων διαχείρισης αποθεμάτων. Τα συστήματα αυτά

αφορούν τη διαχείριση υλικών που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση του προγράμματος παραγωγής.

δ) **ο συγκεντρωτικός προγραμματισμός παραγωγής** που είναι η δραστηριότητα με την οποία καθορίζεται το πρόγραμμα (πλάνο) της παραγωγής συγκεντρωτικά. Το συγκεντρωτικό πρόγραμμα παραγωγής περιλαμβάνει τις μεσοπρόθεσμες αποφάσεις της διοίκησης για τις τιμές των βασικών μεγεθών της παραγωγής.

ε) **ο χρονικός προγραμματισμός παραγωγής** που θέτει το πρόβλημα του προγραμματισμού σε βραχυπρόθεσμη βάση των διατιθέμενων πόρων (ανθρώπινο δυναμικό, μηχανολογικός εξοπλισμός, οικονομικοί πόροι).

στ) **ο προγραμματισμός έργων** τα προβλήματα του οποίου έχουν να κάνουν με το μεγάλο πλήθος των επιμέρους δραστηριοτήτων, από την εκτέλεση και τη διαπλοκή των οποίων εξαρτάται η ολοκλήρωση του ίδιου του έργου.

Στη συνέχεια, αναφερόμαστε στο χρονοπρογραμματισμό ενός συγκεκριμένου συστήματος παραγωγής (flowshop) αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του. Ο όρος «χρονοπρογραμματισμός» έχει ορισθεί από τον Baker το 1974 ως η κατανομή δεδομένων πόρων στη διάρκεια του χρόνου με σκοπό την ολοκλήρωση ενός συνόλου εργασιών. Τα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού συνδυάζουν πολλές επιστημονικές περιοχές οι οποίες είναι διαφορετικές μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα του σχεδιασμού παραγωγής (production planning) και της παραγωγής πλάνων (timetabling). Η θεωρία και οι εφαρμογές του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής έχουν αναπτυχθεί σε ένα σημαντικό πεδίο της έρευνας, τόσο από την πλευρά της επιχειρησιακής έρευνας όσο και από την πλευρά της τεχνητής νοημοσύνης.

Συγκεκριμένα, στο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής ένα σύνολο εργασιών υποβάλλονται σε επεξεργασία στις μηχανές, που διαθέτουν οι σταθμοί παραγωγής, και αυτή η επεξεργασία πρέπει να γίνει με προκαθορισμένη σειρά. Το ζητούμενο είναι να βρεθεί ένα πρόγραμμα που να ικανοποιεί κάποιο κριτήριο αξιολόγησης. Τα πιο συνήθη κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης, ο χρόνος ροής, η καθυστέρηση, ο χρόνος βραδύτερης περάτωσης και ο χρόνος νωρίτερης περάτωσης. Στο πρόβλημα που επιλύεται παρακάτω, το κριτήριο αξιολόγησης είναι η ελαχιστοποίηση του makespan, δηλαδή ο χρόνος νωρίτερης περάτωσης.

Στη συγκεκριμένη εργασία το πρόβλημα που επιλύεται είναι ντετερμινιστικό (deterministic). Ένα πρόβλημα ονομάζεται ντετερμινιστικό όταν όλες οι παράμετροι που το ορίζουν είναι γνωστές και δεδομένες εξ αρχής.

Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος, είναι απαραίτητη η μοντελοποίησή του με βάση κάποιες υποθέσεις που δεν ισχύουν βέβαια στα πραγματικά προβλήματα. Οι κυριότερες υποθέσεις, οι οποίες διαμορφώθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες μετά από έρευνα στις περιοχές της επιχειρησιακής έρευνας και του χρονοπρογραμματισμού και

αποτελούν τα θεμέλια των περισσοτέρων θεωρητικών τεχνικών χρονοπρογραμματισμού, είναι [1]:

1. Στην αρχή και στο τέλος του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού το σύστημα παραγωγής είναι άδειο.
2. Όλες οι εργασίες είναι διαθέσιμες για επεξεργασία τη χρονική στιγμή μηδέν.
3. Οι μηχανές είναι ο σημαντικότερος και καθοριστικός παράγοντας της παραγωγής.
4. Το ανθρώπινο δυναμικό είναι «άφθονο» (plentiful) και οι ικανότητές του δεν αποτελούν περιορισμό στη παραγωγή. Με άλλα λόγια, η τεχνογνωσία και το πλήθος των εργαζομένων δεν λαμβάνονται υπόψη.
5. Κάθε εργασία πηγαίνει σε κάθε μηχανή ακριβώς μία φορά.
6. Όλες οι πληροφορίες σχετικά με τους χρόνους επεξεργασίας είναι αιτιοκρατικές (deterministic) και γνωστές εκ των προτέρων τη χρονική στιγμή μηδέν του προβλήματος.
7. Όλοι οι χρόνοι ετοιμασίας είναι ανεξάρτητοι από τη σειρά των εργασιών και συμπεριλαμβάνονται στους χρόνους επεξεργασίας.
8. Δεν υπάρχουν παράλληλες μηχανές, δηλαδή διαθέτουμε μόνο μία από κάθε είδος μηχανής.
9. Μία λειτουργία μίας εργασίας μπορεί να ολοκληρωθεί μόνο σε μία μηχανή.
10. Όλες οι λειτουργίες μόλις αρχίσουν, ολοκληρώνονται. Δηλαδή δεν μπορούν να διακοπούν και να συνεχίσουν κάποια άλλη χρονική στιγμή.
11. Οι διακοπές των μηχανών (machines breakdowns) δεν λαμβάνονται υπόψη. Θεωρούμε ότι οι μηχανές είναι αξιόπιστες.
12. Δεν είναι διαθέσιμες υπερωρίες (overtime).
13. Κάθε μηχανή μπορεί να επεξεργαστεί και να ολοκληρώσει μία εργασία μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
14. Όλες οι εργασίες είναι της ίδιας σημαντικότητας ή προτεραιότητας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για την επίλυση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε σύστημα flowshop, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος επιλογής κλώνων. Ειδικότερα, περιγράφονται ένα-ένα τα βήματα του αλγορίθμου και οι διάφορες παράμετροί του.

Ο αλγόριθμος επιλογής κλώνων είναι μέρος της εξελικτικής πληροφορικής, η οποία με τη σειρά της είναι ταχέως εξελισσόμενη περιοχή της τεχνητής νοημοσύνης. Ο αλγόριθμος αυτός είναι μια υπολογιστική μέθοδος η οποία αναζητά καλές λύσεις σε ένα πρόβλημα μέσα από ένα μεγάλο αριθμό πιθανών λύσεων. Αυτή η μέθοδος Βελτιστοποίησης, όπως και οι γενετικοί αλγόριθμοι και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών, έχουν εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία και με πολύ καλά αποτελέσματα σε διάφορα προβλήματα. Ορισμένα από αυτά είναι ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας (για παράδειγμα στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή, στο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Marinakis and Marinaki, 2010), τα χρηματοοικονομικά προβλήματα (για παράδειγμα στο πρόβλημα της αξιολόγησης του πιστωτικού κινδύνου (Marinakis et al., 2009a), το πρόβλημα ομαδοποίησης (Marinakis et al., 2009b), τα ιατρικά προβλήματα (για παράδειγμα στο πρόβλημα ταξινόμησης των κυττάρων που λαμβάνονται κατά το τεστ

Παπανικολάου (Marinakis et al., 2009c) και αλλού. Σε επόμενη ενότητα θα αναλυθεί εκτενέστερα η τεχνική του αλγόριθμου επιλογής κλώνων.

Κεφάλαιο 2. Φυσικό Ανοσοποιητικό Σύστημα (Natural Immune System)

2.1 Εισαγωγή

Το ανθρώπινο ανοσοποιητικό σύστημα είναι ένα πολύπλοκο σύστημα, το οποίο αποτελείται από ένα πολύπλοκο δίκτυο από εξειδικευμένα μέλη όπως είναι οι ιστοί, τα όργανα, τα κύτταρα και τα χημικά μόρια. Ορισμένες από τις βασικές ιδιότητες του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος είναι η αναγνώριση, η καταστροφή και η απομνημόνευση ενός πολύ μεγάλου πλήθους ξένων σωματιδίων, καθώς και η προστασία του ανθρώπινου οργανισμού από εισβολείς. Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η κύρια χρήση του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος είναι η προστασία του οργανισμού από τους εισβολείς και για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η ανάπτυξη της ικανότητας της διάκρισης των ξένων από τα μη ξένα κύτταρα.

Το φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα έχει ένα μεγάλο αριθμό από ικανότητες. Ορισμένες από αυτές είναι:

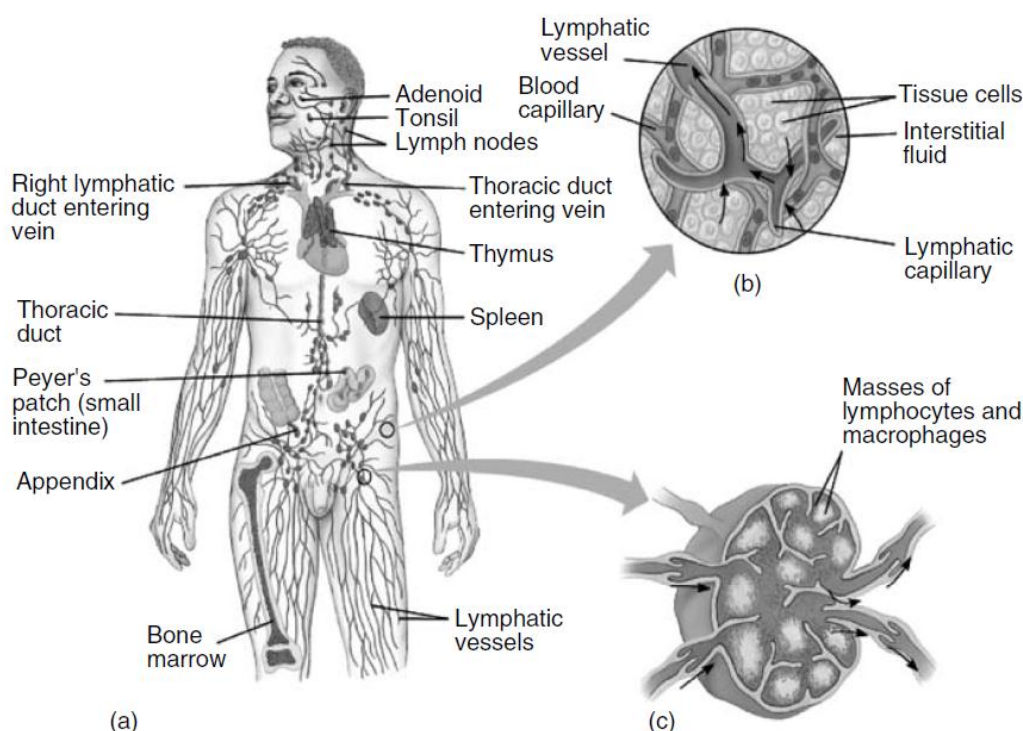
- Να διαχωρίζει τα ξένα από τα δικά του κύτταρα,
- Να αναγνωρίζει και να καταστρέφει ένα μεγάλο αριθμό παθογόνων,
- Να διατηρεί στη μνήμη του τους προηγούμενους εισβολείς,
- Να προστατεύει τον οργανισμό από τη κακή συμπεριφορά των κυττάρων του στο σώμα

Το ανοσοποιητικό σύστημα (IS) έχει μελετηθεί από μεγάλο αριθμό ερευνητών με σκοπό τη μοντελοποίησή του για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι ερευνητές έχουν καταλήξει σε πολλές διαφορετικές απόψεις γύρω από τον τρόπο με τον οποίο το ανοσοποιητικό σύστημα έχει αναπτύξει τις ικανότητες και τις λειτουργίες του. Σύμφωνα με αυτές τις απόψεις έχουν δημιουργηθεί τέσσερα βασικά μοντέλα, τα οποία είναι: η κλασική θεώρηση, σύμφωνα με την οποία τα λεμφοκύτταρα χρησιμοποιούνται προκειμένου να κάνουν το διαχωρισμό μεταξύ των φυσιολογικών από τα ξένα κύτταρα, η θεωρία της επιλογής κλώνων, με βάση την οποία τα ενεργοποιημένα B-κύτταρα παράγουν μεταλλαγμένους κλώνους, η θεωρία κινδύνου η οποία ισχυρίζεται ότι το ανοσοποιητικό σύστημα έχει την δυνατότητα να ξεχωρίζει τα επικίνδυνα από τα μη επικίνδυνα ξένα κύτταρα (αντιγόνα), και τέλος η θεωρία δικτύου στην οποία τα B-κύτταρα δημιουργούν ένα δίκτυο ανιχνευτών, δηλαδή όταν ένα B-κύτταρο αντιδρά σε ένα αντιγόνο, ενεργοποιείται και παρασύρει όλα τα υπόλοιπα B-κύτταρα με τα οποία είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο [2].

Κατά καιρούς, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα τα οποία επιβεβαιώνουν τις παραπάνω θεωρίες και έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε πραγματικά προβλήματα, παραδείγματα των οποίων θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα. Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη ανάλυση των συστατικών του ανοσοποιητικού συστήματος και στον τρόπο λειτουργίας τους.

2.2 Όργανα του Φυσικού Ανοσοποιητικού Συστήματος

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες για τα όργανα του Φυσικού Ανοσοποιητικού Συστήματος: τα κεντρικά λεμφοειδή όργανα και τα περιφερειακά. Ο ρόλος των κεντρικών λεμφοειδών οργάνων είναι να δημιουργούν ώριμα κύτταρα ανοσοποίησης (λεμφοκύτταρα). Σε αυτά τα όργανα ανήκουν ο μυελός των οστών και ο θύμος αδένας. Τα περιφερειακά λεμφοειδή όργανα, λόγω του ότι η συγκέντρωση των αντιγόνων αυξάνεται σε αυτά, διευκολύνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των λεμφοκυττάρων και των αντιγόνων. Στα περιφερειακά λεμφοειδή όργανα ανήκουν η σπλήνα, οι λεμφαδένες, και οι ιστοί του αναπνευστικού συστήματος. Η εικόνα 1 παρουσιάζει τα όργανα του ανοσοποιητικού συστήματος.



Εικόνα 1. Όργανα του Φυσικού Ανοσοποιητικού Συστήματος [9]

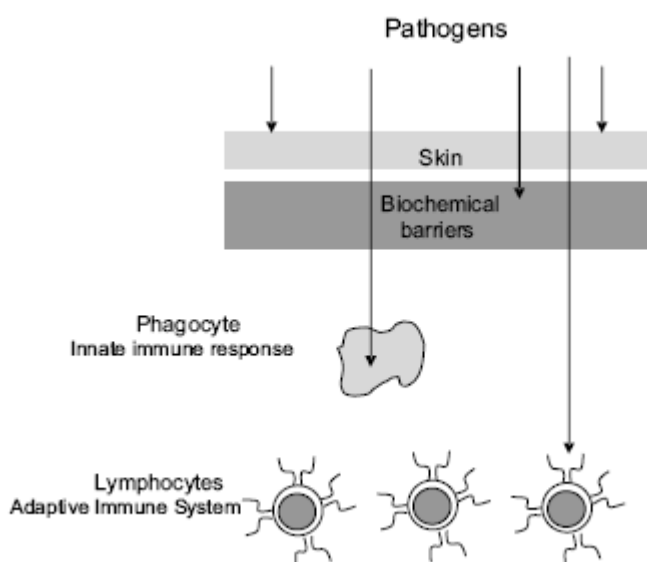
Η κύρια λειτουργία του μυελού των οστών είναι η παραγωγή αιμοσφαιρίων, αιμοπεταλίων, Β-κυττάρων καθώς και εξολοθρευτών, κοκκώδων κυττάρων και ανώριμων κυττάρων θύμου αδένος. Όσο αφορά το θύμο αδένος, ο ρόλος του είναι η παραγωγή ώριμων Τ-κυττάρων. Η σπλήνα είναι ένα όργανο το οποίο αποτελείται από Β-κύτταρα, Τ-κύτταρα, μεγάλα φαγοκύτταρα και αιμοσφαίρια. Στην σπλήνα τα Β-κύτταρα ενεργοποιούνται και παράγουν μεγάλες ποσότητες αντισωμάτων. Επιπλέον, στη σπλήνα καταστρέφονται παλιά αιμοσφαίρια. Οι λεμφαδένες συνίστανται κυρίως από Τ-κύτταρα, Β-κύτταρα, δένδριτικά κύτταρα και μεγάλα φαγοκύτταρα. Τα Τ και Β-κύτταρα αντιλαμβάνονται τα αντιγόνα και με αυτό τον τρόπο ενεργοποιείται η ανοσολογική απόκριση [2],[3].

2.3 Έμφυτη και επίκτητη ανοσοποίηση

Το φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα έχει πολλαπλά επίπεδα υπεράσπισης, όπως φαίνεται από την Εικόνα 2. Η πρώτη γραμμή υπεράσπισης, η οποία αποτελείται για

παράδειγμα από το δέρμα και οι ρινικές τρίχες, ουσιαστικά μπλοκάρει την απορρόφηση παθογόνων μικροοργανισμών. Η παραπάνω ζώνη ενισχύεται από την φυσιολογική άμυνα, όπως είναι τα διάφορα υγρά τα οποία εκκρίνονται από το σώμα (σάλιο, ιδρώτας και δάκρυα) και απομακρύνουν τα παθογόνα από το σώμα, λόγω του ότι τα υγρά αυτά περιέχουν διασπαστικά ένζυμα. Επιπλέον, οι άνθρωποι διαθέτουν έμφυτο και προσαρμόσιμο ανοσοποιητικό σύστημα. Το έμφυτο ανοσοποιητικό σύστημα χρησιμοποιεί ένα πλήθος προτύπων με σκοπό να αναγνωρίζει τα παθογόνα, όπως για παράδειγμα ιούς, βακτήρια και πολυκυτταρικά παράσιτα. Τα πρότυπα αυτά μένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα σταθερά και κωδικοποιούνται στο γονιδίωμα του ανοσοποιητικού συστήματος του ανθρώπου.

Το έμφυτο ανοσοποιητικό σύστημα δημιουργείται από τη γέννηση και δεν προσαρμόζεται κατά τη διάρκεια της ζωής ενός ατόμου. Σε περίπτωση που το έμφυτο ανοσοποιητικό σύστημα δεν μπορεί να απομακρύνει ένα παθογόνο που προσπαθεί να εισβάλλει στον άνθρωπο, τότε αναλαμβάνει δράση το επίκτητο ανοσοποιητικό σύστημα. Το επίκτητο ανοσοποιητικό σύστημα κατευθύνεται ενάντια συγκεκριμένων παθογόνων και τροποποιείται από την έκθεση σε αυτά. Έτσι, το ανοσοποιητικό σύστημα δημιουργεί και διατηρεί ένα ιστορικό των εισβολέων και των τρόπων που αυτοί αντιμετωπίζονται [4].



Εικόνα 2. Ανοσοποιητικό σύστημα [4]

2.4 Συστατικά του ανοσοποιητικού συστήματος

Το φυσικό όπως και το επίκτητο ανοσοποιητικό σύστημα αποτελούνται από μια ποικιλία από μόρια, κύτταρα και ιστούς. Τα σημαντικότερα κύτταρα είναι τα λευκά αιμοσφαίρια τα οποία μπορούν να διαιρεθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες: τα φαγοκύτταρα και τα λεμφοκύτταρα. Η πρώτη ομάδα ανήκει στο έμφυτο ανοσοποιητικό σύστημα, ενώ η δεύτερη ομάδα μεσολαβεί προκειμένου να επιτευχθεί η επίκτητη ανοσοποίηση.

Τα λεμφοκύτταρα κυκλοφορούν διαρκώς στο αίμα, στους λεμφαδένες και στους ιστούς. Τα λεμφοκύτταρα αποτελούνται από τα Β και Τ-κύτταρα που παράγονται στο

μυελό των οστών. Τα παραπάνω κύτταρα είναι ικανά να αναγνωρίζουν και να αντιδρούν σε συγκεκριμένα πρότυπα αντιγόνων (ξένα μόρια) τα οποία εμφανίζονται στην επιφάνεια των παθογόνων. Τα αντιγόνα δεν είναι τα παθογόνα τα οποία εισβάλλουν, αλλά αποτελούν μοριακές υπογραφές οι οποίες δηλώνονται από το παθογόνο που εισβάλλει στον οργανισμό. Εξαιτίας αυτών των αντιγόνων προκαλείται η αντίδραση του ανοσοποιητικού συστήματος.

Για τη διαδικασία αναγνώρισης πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν τα μόρια του συμπλέγματος ιστοσυμβατότητας (MHC). Τα μόρια αυτά έχουν ως σκοπό να μεταφέρουν τα πολυπεπίδια από το εσωτερικό του κυττάρου στην εξωτερική επιφάνεια του κυττάρου για να τα αναγνωρίσουν τα T-κύτταρα. Ο παραπάνω μηχανισμός καθιστά ικανά τα συστατικά μέρη του ανοσοποιητικού συστήματος να αναγνωρίζουν μια πιθανή μόλυνση μέσα στα κύτταρα χωρίς να διεισδύσουν στην κυτταρική μεμβράνη. Ο έλεγχος της επίκτητης ανοσοποίησης μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες: την ανοσοποίηση αναφερόμενη στα σωματικά υγρά, η οποία ελέγχεται από τα B κύτταρα και την κυτταρική ανοσοποίηση, η οποία ελέγχεται από τα T κύτταρα.

Η πρώτη κατηγορία ανοσοποίησης επιτυγχάνεται με τη μεσολάβηση αντισωμάτων που περιέχονται στα σωματικά υγρά ('humors'), και περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση των B-κυττάρων με τα αντιγόνα, όπως και την επακόλουθη διάδοση και διαφοροποίηση των B-κυττάρων σε αντισώματα που εκκρίνουν τα κύτταρα του πλάσματος. Τα αντισώματα λειτουργούν ως επενεργητές της ανοσοποίησης, μιας και δεσμεύονται στα αντιγόνα και με αυτόν τον τρόπο βοηθούν στην εξάλειψή τους. Η δεύτερη κατηγορία ανοσοποίησης επιτυγχάνεται μέσω των κυττάρων, και διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στη εξουδετέρωση των μολυσμένων από ιούς κυττάρων. Πιο συγκεκριμένα, δραστικά T- κύτταρα, που παράγονται σε απάντηση σε ένα αντιγόνο, είναι υπεύθυνα για την κυτταρική ανοσία. Τα κυτταροτοξικά T-λεμφοκύτταρα (CTLs) συμμετέχουν στο κελί στην αντίδραση της κυτταρικής ανοσοποίησης με την εξουδετέρωση μεταβαλλόμενων αυτοκυττάρων. Τέλος, τα T- και B-κύτταρα εκκρίνουν λεμφοκίνες, ενώ τα μεγάλα φαγοκύτταρα εκκρίνουν μονοκίνες. Αυτές οι πρωτεΐνες ονομάζονται κυτταροκίνες και η λειτουργία τους είναι να συμβάλλουν στην ανάπτυξη των κυττάρων και να προωθούν την ενεργοποίηση των κυττάρων ή να καταστρέφουν έναν ορισμένο αριθμό κυττάρων-στόχων [5],[6].

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των διαφορετικών τύπων κυττάρων στο ανοσοποιητικό σύστημα, τα αντιγόνα και τα αντισώματα, την αντίδραση του ανοσοποιητικού συστήματος, τα είδη ανοσοποίησης και τη διαδικασία αντίδρασης των ξένων σωμάτων όπως καθορίζεται από τις διαφορετικές θεωρίες.

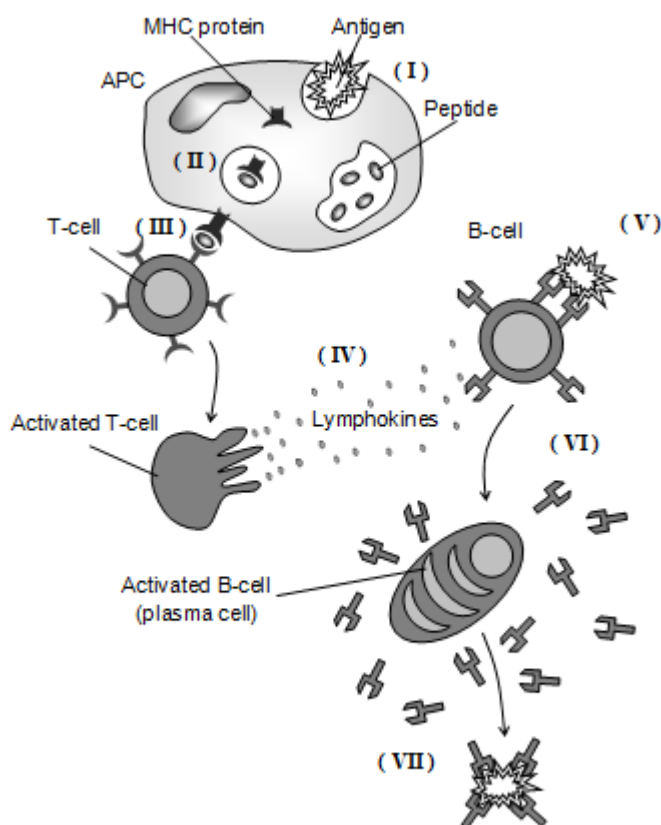
2.5 Ο τρόπος δράσης του ανοσοποιητικού συστήματος στον οργανισμό μας

Ο ανθρώπινος οργανισμός προστατεύεται από ένα σύνολο κυττάρων και μορίων, τα οποία συνεργάζονται ενάντια στο αντιγόνο, το οποίο είναι συνήθως ένα ξένο μόριο είτε ενός βακτηρίου είτε κάποιου άλλου εισβολέα.

Ειδικά αντιγόνο-παρουσιαστικά (APC) κύτταρα, όπως είναι τα μεγάλα φαγοκύτταρα, κυκλοφορούν διαρκώς στον οργανισμό μας απορροφώντας τα αντιγόνα που εντοπίζουν και θρυμματίζοντάς τα σε αντιγονικά πεπτίδια (Εικ.3-Ι). Μέρη αυτών των

πεπτιδίων συνδέονται με τα μόρια του συμπλέγματος ιστοσυμβοτότητας (MHC). Ο σκοπός των μορίων αυτών είναι να μεταφέρουν τα πεπτίδια από το εσωτερικό του κυττάρου στην επιφάνεια του. Τα Τ-κύτταρα ή αλλιώς λεμφοκύτταρα έχουν ειδικούς μοριακούς υποδοχείς, οι οποίοι τους επιτρέπουν να αναγνωρίζουν τους συνδυασμούς των πεπτιδίων-MHC μορίων (Εικ.3-II). Τα ενεργοποιημένα Τ-κύτταρα εκκρίνουν λεμφοκίνες ή χημικά σήματα τα οποία ενεργοποιούν άλλα συστατικά μέρη του ανοσοποιητικού συστήματος (Εικ.3-III).

Τα Β-λεμφοκύτταρα, τα οποία διαθέτουν μοριακούς υποδοχείς μοναδικής ειδικότητας στην επιφάνεια τους, αποκρίνονται στα παραπάνω σήματα. Σε αντίθεση με τα Τ-κύτταρα τα Β-λεμφοκύτταρα μπορούν να αναγνωρίσουν μέρη των αντιγόνων χωρίς την ύπαρξη του MHC μορίου (Εικ.3-IV). Τα ενεργοποιημένα Β-λεμφοκύτταρα διαιρούνται και διαφοροποιούνται σε κύτταρα πλάσματος, τα οποία εκκρίνουν αντισώματα που είναι διαλυτές μορφές των υποδοχέων τους (Εικ.3-V). Όταν τα αντισώματα ταιριάζουν με τα αντιγόνα μπορούν να τα αδρανοποιήσουν (Εικ.3-VI) ή να επιταχύνουν την καταστροφή τους είτε με συμπληρωματικά ένζυμα είτε με κύτταρα 'καθαριστές'. Μερικά από τα Τ και Β-κύτταρα μετατρέπονται σε κύτταρα μνήμης, τα οποία κυκλοφορούν στον οργανισμό και ενισχύουν την άμεση αντίδραση του ανοσοποιητικού συστήματος σε περίπτωση που θα αντιμετωπίσει το ίδιο αντιγόνο στο μέλλον. Μιας και τα γονίδια των Β-κυττάρων συχνά υφίστανται μετάλλαξη, η απόκριση των αντισωμάτων βελτιώνεται με τις επαναλαμβανόμενες ανοσοποιήσεις. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μετάλλαξη της συγγένειας.



Εικόνα 3. Ο τρόπος δράσης του ανοσοποιητικού συστήματος [7]

2.6 Σωματική υπερμετάλλαξη

Κατά τη διάρκεια της εξαρτημένης από τα T-κύτταρα αντίδρασης του ανοσοποιητικού συστήματος, υπάρχει μια ποικιλομορφία ανάμεσα στα ενεργοποιημένα B-κύτταρα, η οποία οφείλεται σε δύο μηχανισμούς: την υπερμετάλλαξη και την διόρθωση των υποδοχέων. Μόνο οι εκδοχές των κυττάρων που εμφανίζουν την μεγαλύτερη συγγένεια προστίθενται στο σύνολο των κυττάρων μνήμης. Η παραπάνω διαδικασία είναι ουσιαστικά μια διαδικασία ωρίμανσης του ανοσοποιητικού και πραγματοποιείται σε ένα ειδικό περιβάλλον το οποίο ονομάζεται βλαστικό κέντρο (Germinal Center).

Τα αντισώματα που συμμετέχουν σε μια αντίδραση μνήμης έχουν συνήθως μεγαλύτερη συγγένεια σε σχέση με τα αντίστοιχα της πρωταρχικής αντίδρασης. Αυτό οφείλεται στην ωρίμανση που υφίστανται τα λεμφοκύτταρα και υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη μετάλλαξης της Y-περιοχής του αντισώματος: οι μεταλλάξεις σημείων, οι σύντομες διαγραφές και η μεταλλαγή μετατόπισης.

Οι αλλαγές που πραγματοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις τυχαία, οδηγούν στην αύξηση της συγγένειας του αντισώματος. Τα αντισώματα αυτά επιλέγονται σαν κύτταρα μνήμης. Λόγω της τυχαίας φύσης της διαδικασίας της σωματικής μετάλλαξης, ένα μέρος των μεταλλαγμένων γονιδίων μπορεί να μετατραπεί σε μη λειτουργικό είτε να αναπτύξει βλαβερές ιδιότητες για τον ανθρώπινο οργανισμό. Τα κύτταρα αυτά πρέπει να εξαλειφθούν για να μην συμπεριληφθούν στα κύτταρα μνήμης. Η διαδικασία μέσω της οποίας εξαλείφονται τα B-κύτταρα δεν είναι πλήρως κατανοητή. Η διαδικασία της 'διάλυσης' στο βλαστικό κέντρο είναι πιθανώς υπεύθυνη για την εξάλειψη των κυττάρων.

Η αύξηση της συγγένειας των αντισωμάτων κατά τη δευτερογενή αντίδραση σε σχέση με την αρχική υποδεικνύει ότι η ωρίμανση του ανοσοποιητικού συστήματος είναι μια συνεχής διαδικασία. Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά των αποκρίσεων του προσαρμοζόμενου ανοσοποιητικού συστήματος είναι: η επαρκής ποικιλία έτσι ώστε να ανταπεξέλθουν στην αντιμετώπιση των διαφορετικών αντιγόνων, η διάκριση μεταξύ των φυσιολογικών και μη φυσιολογικών κυττάρων και η ανοσολογική μνήμη μεγάλης διάρκειας. Πέρα από την επιλογή των κλώνων, η οποία είναι και η κλασική άποψη που προτάθηκε από τον Burnet (1959), πρόσφατα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το ανοσοποιητικό σύστημα εφαρμόζει μοριακή επιλογή των υποδοχέων σε συνδυασμό με την επιλογή κλώνων.

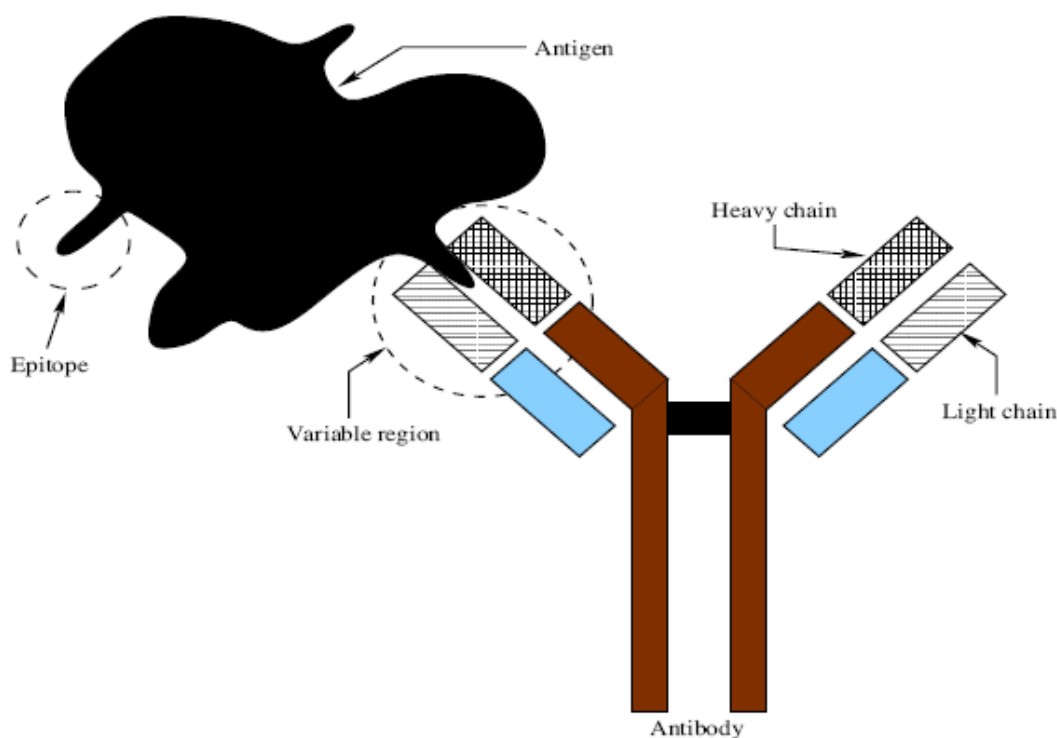
Η τροποποίηση των υποδοχέων των B-κυττάρων προσφέρει τη δυνατότητα διαφυγής από ένα τοπικό ελάχιστο συγγένειας. Επομένως, οι μετατροπές των υποδοχέων και οι μεταλλάξεις σημείων αποτελούν συμπληρωματικές διαδικασίες κατά την ωρίμανση του ανοσοποιητικού. Τέλος, στα παραπάνω συμπεριλαμβάνεται και η εισαγωγή καινούριων κυττάρων από τον μυελό των οστών, τα οποία προστίθενται στα λεμφοκύτταρα έτσι ώστε να διατηρείται η ποικιλομορφία του πληθυσμού [6].

2.7 Αντιγόνα και αντισώματα

Στο φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα, η αντίδραση που προκαλείται από την εμφάνιση ενός αντιγόνου γίνεται έτσι ώστε να αποφευχθεί η βλάβη που μπορεί να προκληθεί από αυτό. Το αντιγόνο είναι γενικά ένα σύνθετο μόριο όπως μια πρωτεΐνη ή ένας

υδρογονάνθρακας που όταν εισέρχεται σε οργανικό σώμα προκαλεί μια ανοσοποιητική απόκριση, η οποία και περιλαμβάνει την παραγωγή συγκεκριμένων κάθε φορά αντισωμάτων. Τα αντιγόνα μπορεί να είναι τοξίνες, ή ακόμη και μόρια στην επιφάνεια των κυττάρων και μπορούν να αναγνωριστούν, όπως αναφέραμε προηγουμένως, όταν δημιουργείται ένας μοριακός δεσμός μεταξύ ενός αντιγόνου και των υποδοχέων στην επιφάνεια των B-κυττάρων. Εξαιτίας του μεγάλου πλήθους και της μεγάλης πολυπλοκότητας των περισσότερων αντιγόνων μόνο μέρη των αντιγόνων, τα οποία ονομάζονται επιτομές, συνδέονται με τους υποδοχείς των B-κυττάρων, όπως φαίνεται στην εικόνα 4. Οι επιτομές πυροδοτούν μια ειδική αντίδραση του ανοσοποιητικού συστήματος και οι υποδοχείς των αντισωμάτων συνδέονται με τις επιτομές μέσω μιας ειδικής δύναμης ταιριάσματος, η οποία ονομάζεται συγγένεια ή αλλιώς συνάφεια.

Ένα λεμφοκύτταρο διαθέτει περίπου 10^5 υποδοχείς στην επιφάνειά του και επειδή όλοι αυτοί οι υποδοχείς έχουν την ίδια δομή, ένα μόνο λεμφοκύτταρο μπορεί να ταιριάζει με τις σχετικές επιτομές. Το πλήθος των υποδοχέων το οποίο δεσμεύεται από τα παθογόνα καθορίζει την συγγένεια του λεμφοκυττάρου με ένα δεδομένο παθογόνο. Εάν η συγγένεια που προκύπτει δεν υπερβαίνει το κατώτατο αποδεκτό όριο, το λεμφοκύτταρο στέλνει ένα σήμα στα κύτταρα και με αυτόν τον τρόπο ενεργοποιείται η απόκριση του ανοσοποιητικού συστήματος [8].



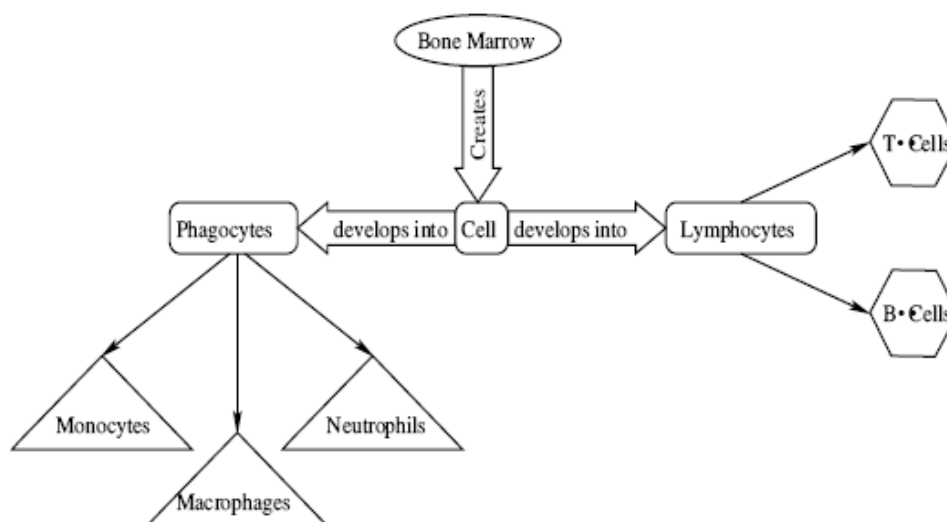
Εικόνα 4. Σύμπλεγμα αντιγόνου-αντισώματος [18]

Τα αντισώματα είναι χημικές πρωτεΐνες, οι οποίες εκκρίνονται στο αίμα ως αντίδραση σε ένα ερέθισμα που προέρχεται από ένα αντιγόνο και το εξουδετερώνουν μέσω της σύνδεσής τους με αυτό. Σε αντίθεση με τα αντιγόνα, τα αντισώματα αποτελούν μέρος των φυσιολογικών σωματιδίων (*self*) και παράγονται όταν τα λεμφοκύτταρα έρχονται σε επαφή με τα αντιγόνα (*non self*). Το αντίσωμα έχει Y σχηματισμό (εικόνα 4) και αποτελείται από μια ελαφριά πολυπεπτιδική αλυσίδα και μια βαριά πολυπεπτιδική αλυσίδα αντισωμάτων. Η διάκριση ανάμεσα στις δύο

αλυσίδες γίνεται για τον λόγο ότι η βαριά αλυσίδα συνίσταται από τον διπλάσιο αριθμό αμινοξέων από ότι η ελαφριά αλυσίδα. Οι ποικίλες περιοχές επιτρέπουν στο αντίσωμα να ταιριάζει με το αντιγόνο και να ενωθεί με τις επιτομές του αντιγόνου. Όταν πραγματοποιηθεί η παραπάνω ένωση δημιουργείται ένα σύμπλοκο αντιγόνου-αντισώματος το οποίο οδηγεί στην αδρανοποίηση του αντιγόνου. Τα αντισώματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 5 ομάδες: IgM, IgG, IgA, IgE, IgD [8].

2.8 Λευκά κύτταρα

Όλα τα κύτταρα στο σώμα δημιουργούνται στον μυελό των οστών, όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Ορισμένα από αυτά τα κύτταρα εξελίσσονται σε λευκά κύτταρα, τα οποία ονομάζονται φαγοκύτταρα. Τα φαγοκύτταρα περιέχουν μονοκύτταρα, μεγάλα φαγοκύτταρα και φαγοκυτταρικά κύτταρα αίματος. Τα μεγάλα φαγοκύτταρα είναι ευμετάβλητα κύτταρα τα οποία εκκρίνουν ισχυρά χημικά και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ενεργοποίηση των T-κυττάρων, όπως αναφέραμε και παραπάνω. Άλλα κύτταρα εξελίσσονται σε μικρά λευκά κύτταρα, τα οποία ονομάζονται λεμφοκύτταρα.



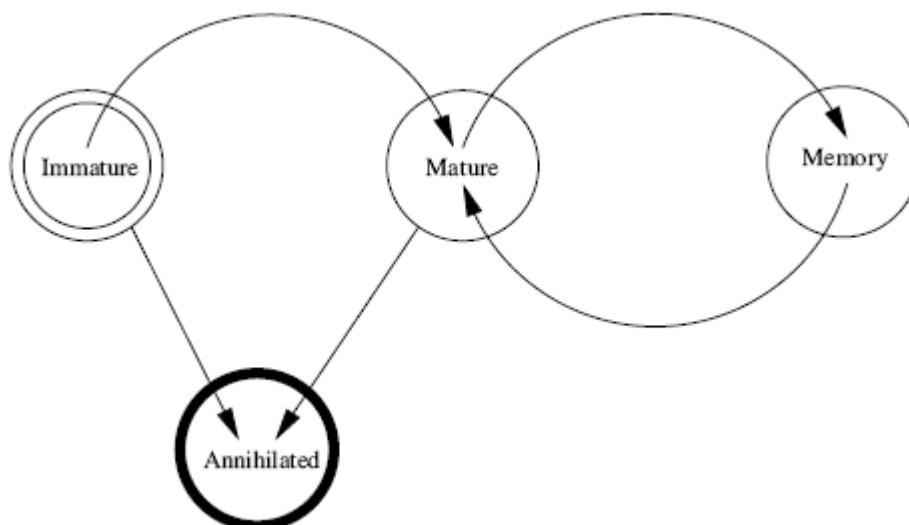
Εικόνα 5. Τύποι των λευκών κυττάρων [8]

2.9 Λεμφοκύτταρα

Υπάρχουν δύο κατηγορίες λεμφοκυττάρων: τα T-κύτταρα και τα B-κύτταρα, τα οποία δημιουργούνται στο μυελό των οστών. Στην επιφάνεια των T και B-κυττάρων υπάρχουν υποδοχείς μέσω των οποίων ενώνονται με τα άλλα κύτταρα. Τα T-κύτταρα ενώνονται με σωματίδια τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια άλλων κυττάρων. Τα T-κύτταρα αρχικά ωριμάζουν στον θύμο αδέν, ενώ τα B-κύτταρα είναι έτοιμα μετά τη δημιουργία τους στον μυελό των οστών. Ένα T-κύτταρο ωριμάζει αν και μόνο αν δεν διαθέτει υποδοχείς οι οποίοι να μπορούν να ενωθούν με μόρια τα οποία αναπαριστούν φυσιολογικά κύτταρα (*self*). Τα λεμφοκύτταρα υπάρχουν σε διαφορετικές φάσεις: ώριμα, ανώριμα και λεμφοκύτταρα μνήμης. Στην εικόνα 6 φαίνεται ο κύκλος ζωής των λεμφοκυττάρων.

Τα T και B κύτταρα εκκρίνουν λεμφοκίνες ενώ τα μεγάλα φαγοκύτταρα εκκρίνουν μονοκίνες. Οι δυο παραπάνω πρωτεΐνες είναι γνωστές και ως κυτταροκίνες και η

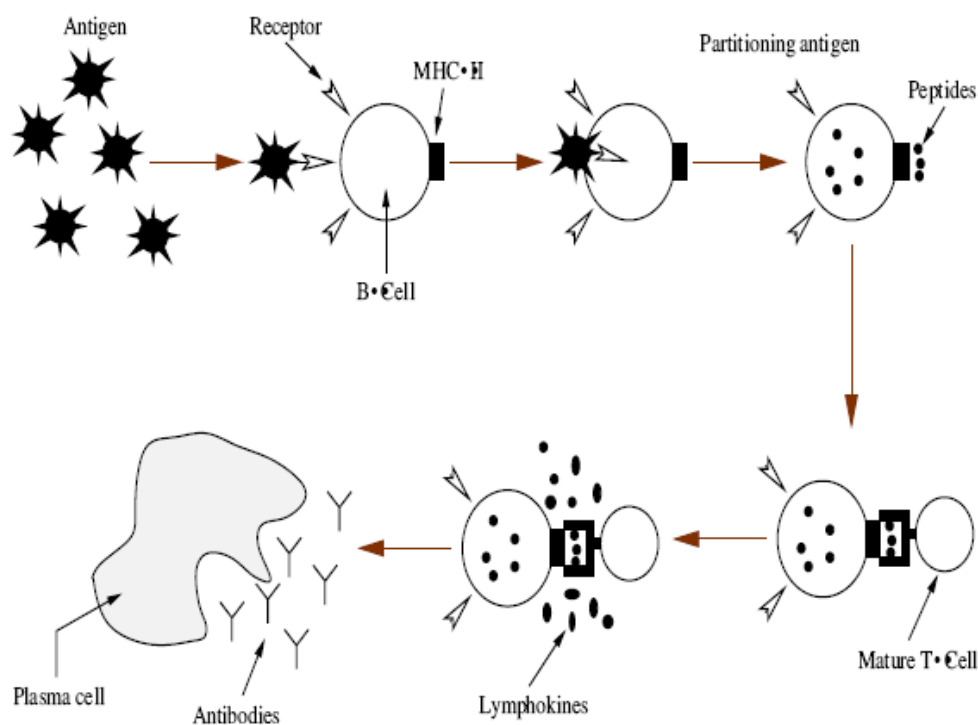
λειτουργία τους είναι να συμβάλλουν στην ανάπτυξη των κυττάρων και να προωθούν την ενεργοποίηση των κυττάρων ή να καταστρέφουν ορισμένα κύτταρα-στόχους [8].



Εικόνα 6. Κύκλος ζωής των λεμφοκυττάρων [8]

Τα Β-κύτταρα δημιουργούνται στο μυελό των οστών με μονομερείς IgM υποδοχείς στην επιφάνειά τους. Μονομερής υποδοχέας ονομάζεται ένα χημικό συστατικό το οποίο υφίσταται μια χημική αντίδραση με άλλα μόρια με σκοπό να δημιουργηθούν μεγαλύτερα μόρια. Αντίθετα με τα Τ-κύτταρα, τα Β-κύτταρα υπάρχουν κυρίως στην σπλήνα και στις αμυγδαλές και είναι τα σημεία όπου τα Β-κύτταρα μετατρέπονται σε κύτταρα πλάσματος αφού έχουν έρθει προηγουμένως σε επαφή με τα αντιγόνα. Στη συνέχεια, τα κύτταρα πλάσματος παράγουν αντισώματα τα οποία είναι αποτελεσματικά ενάντια στα αντιγόνα.

Τα Β-κύτταρα έχουν ειδικούς υποδοχείς για αντιγόνα ώστε να τα αναγνωρίζουν. Όταν πραγματοποιείται η επαφή του αντιγόνου με το Β-κύτταρο, αρχίζει η κλωνοποίηση των Β-κυττάρων, η οποία ενισχύεται από τα βοηθητικά Τ-κύτταρα. Κατά τη διάρκεια της κλωνοποίησης δυο τύποι κυττάρων δημιουργούνται: τα κύτταρα πλάσματος και τα κύτταρα μνήμης. Η λειτουργία των κυττάρων μνήμης είναι να εξαπλωθούν στα κύτταρα πλάσματος έτσι ώστε να διασφαλιστεί η γρήγορη αντίδραση προς τα αντιγόνα που εμφανίζονται συχνά, καθώς και η παραγωγή αντισωμάτων την εξουδετέρωσή τους [8]. Στην παρακάτω εικόνα 7 παρουσιάζεται ο τρόπος μετατροπής των Β-κυττάρων σε κύτταρα πλάσματος παράγοντας αντισώματα.



Εικόνα 7. Ο τρόπος μετατροπής των B-κυττάρων σε κύτταρα πλάσματος παράγοντας αντισώματα [17]

2.10 Μνήμη του ανοσοποιητικού συστήματος

Αν το ανοσοποιητικό σύστημα αντιμετωπίζει ένα αντιγόνο για πρώτη φορά, προκαλείται μια πρωταρχική απόκριση στο προσαρμοστικό ανοσοποιητικό σύστημα, και θα δημιουργηθεί στον οργανισμό μια μόλυνση μέσω της οποίας το ανοσοποιητικό σύστημα μαθαίνει να αναγνωρίζει το αντιγόνο. Η αντίδραση του οργανισμού στην εισβολή είναι η παραγωγή ενός μεγάλου πλήθους αντισωμάτων, η οποία θα βοηθήσει στην απομάκρυνση του παθογόνου από το σώμα. Αφού η μόλυνση εξαλειφθεί, μια μνήμη των επιτυχών υποδοχέων διατηρείται έτσι ώστε να επιτραπεί γρηγορότερη απόκριση σε περίπτωση που ίδια ή παρόμοια παθογόνα εισβάλλουν στο σώμα.

Η δευτερογενής απόκριση χαρακτηρίζεται από μια γρηγορότερη και αφθονότερη παραγωγή σχετικών αντισωμάτων συγκριτικά με την αρχική απόκριση. Εάν μια παρόμοια, αλλά όχι ίδια, παραλλαγή του παθογόνου αντιμετωπιστεί αργότερα, μια δευτερογενής απόκριση μπορεί να προκληθεί από ένα αντίσωμα στο αρχικό αντιγόνο το οποίο ταιριάζει αρκετά με τα διαφοροποιημένα αντιγόνα του νέου παθογόνου. Επομένως εάν μια μεταλλαγμένη έκδοση του αρχικού παθογόνου αντιμετωπιστεί, το ανοσοποιητικό σύστημα είναι ήδη εν μέρει προσαρμοσμένο έτσι ώστε να το αντιμετωπίσει, βασισμένο στην προηγούμενη γνώση του. Αυτή είναι η έννοια που κρύβεται πίσω από τη διαδικασία της ανοσοποίησης ενάντια σε μια ασθένεια που χρησιμοποιεί μια μη-επιβλαβή παραλλαγή της ίδιας της ασθένειας [8].

2.11 Μοντέλα του Φυσικού Ανοσοποιητικού Συστήματος

Σύμφωνα με την κλασική άποψη το φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα μπορεί να διακρίνει τα φυσιολογικά (δικά του) και τα ξένα (όχι-δικά του ή αντιγόνα) κύτταρα στο σώμα. Η αναγνώριση των αντιγόνων προκαλεί τη δημιουργία ειδικευμένων

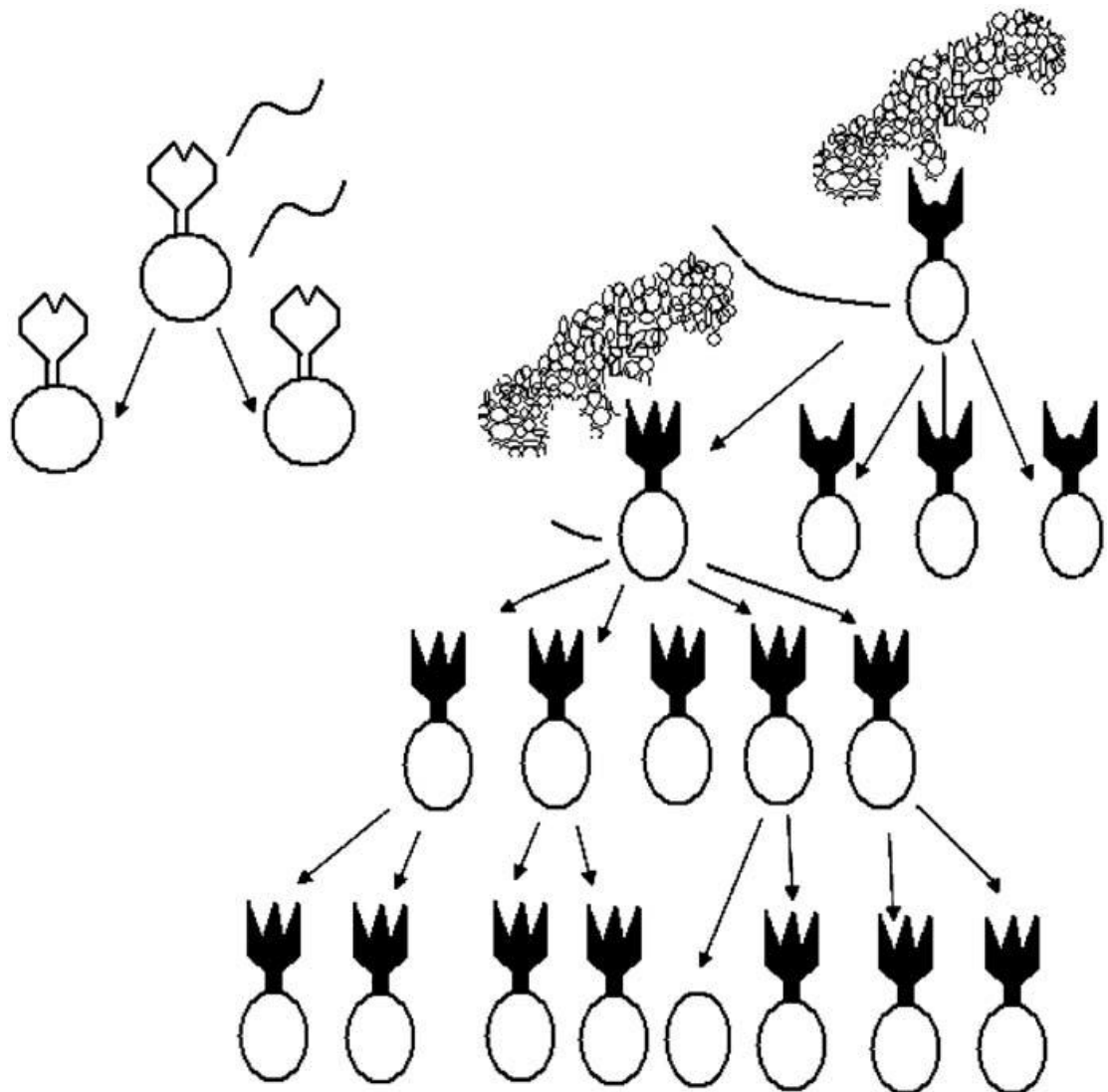
ενεργοποιημένων κυττάρων, τα οποία απενεργοποιούν ή καταστρέφουν αυτά τα αντιγόνα. Η κλασική άποψη για το ανοσοποιητικό σύστημα καθιερώθηκε από τον Burnet και υποστηρίζει ότι τα Β-κύτταρα και Τ-κύτταρα διαθέτουν ειδικούς υποδοχείς αντιγόνων. Με αυτόν τον τρόπο, τα αντιγόνα προκαλούν την αντίδραση του ανοσοποιητικού συστήματος, η οποία είναι γνωστή ως παρακίνηση (ή σήμα 1), αλληλεπιδρώντας με αυτούς τους υποδοχείς. Επίσης, οι Bretscher και Cohn εισήγαγαν την έννοια των βοηθητικών Τ-κυττάρων (γνωστά ως σήμα 2). Αργότερα, οι Lafferty and Cunningham πρόσθεσαν ένα παρακινητικό σήμα στο βοηθητικό Τ-κύτταρο των Bretscher και Cohn.

Ο Burnet (1959) πρότεινε τη θεωρία επιλογής κλώνων για να εξηγήσει την εξάπλωση των κυττάρων του ανοσοποιητικού συστήματος στην παρουσία του αντιγόνου. Αυτή η θεωρία υποστηρίζει ότι ένα αντιγόνο επιλέγει (ή προκαλεί) ένα συγκεκριμένο λεμφοκύτταρο από ένα μεγάλο αριθμό λεμφοκυττάρων με σκοπό την παραγωγή κλώνων. Δεδομένης της μεγάλης ποικιλίας των υποδοχέων των λεμφοκυττάρων, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τυχαίο γεγονός αν οι υποδοχείς για κάθε συγκεκριμένο λεμφοκύτταρο ανιχνεύσουν το αντιγόνο. Η ενεργοποίηση, όμως, αυτών των λεμφοκυττάρων πολλαπλασιάζεται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται κλωνοποίηση. Η εικόνα 8 απεικονίζει την επέκταση κλώνων και την επιλογή των Β λεμφοκυττάρων παρουσία του αντιγόνου (Hightower, 1996).

Οι βασικές ιδιότητες της επιλογής κλώνων είναι (Burnet, 1976, Stewart και άλλοι, 1989) :

- Η εξάλειψη των κλώνων αυτο-αντίδρασης
- Ο πολλαπλασιασμός και η διαφοροποίηση των ώριμων λεμφοκυττάρων μέσω αντιγονικής προσομοίωσης
- Ο περιορισμός του ενός προτύπου σε ένα διαφοροποιημένο κύτταρο και τη διατήρηση αυτού του προτύπου από τους απογόνους κλώνων
- Η παραγωγή νέων τυχαίων γενετικών αλλαγών που στη συνέχεια εκφράζονται ως διαφορετικοί τύποι αντισωμάτων από μια μορφή της ταχείας σωματικής μετάλλαξης

Άλλοι ερευνητές εξέτασαν επίσης την επιλογή των κλώνων έτσι ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος για το πώς ορισμένοι τύποι του Β και τα Τ- λεμφοκύτταρα έχουν επιλεγεί για την καταστροφή των ειδικών αντιγόνων, τα οποία έχουν εισβάλλει στο σώμα μας [9].



Εικόνα 8. Η επέκταση κλώνων και η επιλογή των B λεμφοκυττάρων παρουσία του αντιγόνου [9]

Η θεωρία κινδύνου αναπτύχθηκε από τον Matzinger και βασίζεται στο μοντέλο συμπαράστασης των Lafferty και Cunningham. Η κύρια ιδέα αυτής της θεωρίας είναι ότι το ανοσοποιητικό σύστημα διακρίνει μεταξύ του τι είναι επικίνδυνο και του τι δεν είναι στον άνθρωπο. Η διαφορά αυτής της θεωρίας από την κλασική θεώρηση του ανοσοποιητικού συστήματος είναι ότι το ανοσοποιητικό σύστημα δεν αντιδρά σε όλα τα ξένα σώματα αλλά μόνο σε εκείνα που είναι επιβλαβή ή επικίνδυνα για τον σώμα μας. Ένα ξένο κύτταρο θεωρείται επικίνδυνο για το ανθρώπινο σώμα αν προκαλεί τη βλάβη ή το θάνατο των κυττάρων του σώματος. Αν και ο θάνατος των κυττάρων είναι φυσιολογικός μέσα στο ανθρώπινο σώμα, το ανοσοποιητικό σύστημα αντιδρά μόνο σε αυτούς που δεν είναι φυσιολογικοί. Όταν ένα κύτταρο μολύνεται από έναν ιό, το κύτταρο αυτό θα στείλει ένα σήμα του νεκρωτικού θανάτου, κάτι που είναι γνωστό ως σήμα 0, για να ενεργοποιήσει τα αντιγόνο-παρουσιαστικά κύτταρα. Συνεπώς, η συμπαράκinese ενός αντιγόνο-παρουσιαστικού κυττάρου σε ένα βοηθητικό T-κύτταρο είναι δυνατή μόνο αν το αντιγόνο-παρουσιαστικό κύτταρο ενεργοποιήθηκε από ένα σήμα κινδύνου. Βάση της θεωρίας κινδύνου, ένα T-κύτταρο χρειάζεται μόνο να είναι ικανό να διαφοροποιήσει ένα αντιγόνο-παρουσιαστικό κύτταρο από τα άλλα. Αν ένα αντιγόνο-παρουσιαστικό κύτταρο ενεργοποιήσει ένα T-

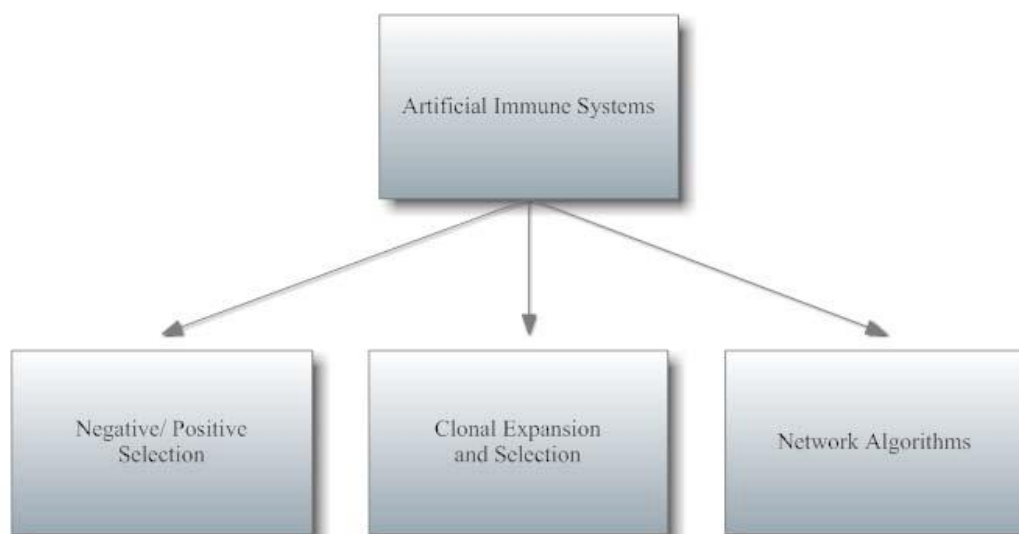
κύτταρο μέσω συμπαράκινησης, τότε μόνο το ανοσοποιητικό σύστημα θα αντιδράσει με πολλαπλασιασμό των κλώνων των B-κυττάρων. Τα B-κύτταρα θα εκκρίνουν αντισώματα που θα συνδεθούν με τα επικίνδυνα αντιγόνα αντί να συνδεθούν με όλα τα ξένα επιβλαβή αντιγόνα.

Σύμφωνα με τη θεωρία δικτύου, η οποία αναπτύχθηκε αρχικά από τον Jerne, τα B-κύτταρα διασυνδέονται για να σχηματίσουν ένα δίκτυο κυττάρων. Όταν ένα B-κύτταρο στο δίκτυο αντιδρά σε ένα ξένο κύτταρο, το ενεργοποιημένο B-κύτταρο παρακινεί όλα τα άλλα B-κύτταρα με τα οποία είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Επομένως, ένα λεμφοκύτταρο δεν παρακινείται μόνο από ένα αντιγόνο, αλλά μπορεί και να παρακινηθεί ή να κατασταλεί από γειτονικά λεμφοκύτταρα. Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι ένα γειτονικό λεμφοκύτταρο μπορεί με τη σειρά του να αντιδράσει στην παρακίνηση ενός παρακινημένου από ένα αντιγόνο λεμφοκυττάρου δημιουργώντας μεταλλαγμένους κλώνους, παρακινώντας το επόμενο σύνολο γειτόνων και ούτω καθεξής.

Κεφάλαιο 3. Το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα

3.1 Εισαγωγή

Τα Τεχνητά Ανοσοποιητικά Συστήματα (Artificial Immune Systems (AIS)) εμπνέονται από τα φυσικά ανοσοποιητικά συστήματα (Natural Immune System). Ο στόχος της δημιουργίας των AIS δεν είναι η αναπαραγωγή ακριβών μοντέλων του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος, αλλά η εξαγωγή ιδεών και μεταφορών από τον τρόπο λειτουργίας του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων που έχουν σκοπό τη λύση πραγματικών προβλημάτων. Τα AIS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ομάδες, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικ.9), με βάση τα διακριτά χαρακτηριστικά του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος [10].



Εικόνα 9. Ταξινόμηση των AIS αλγόριθμων

3.2 Μοντέλα του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μια περιγραφή για τον τρόπο λειτουργίας του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος (NIS). Οι ικανότητες του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος τις οποίες εκμεταλλεύεται το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα αναφέρονται περιληπτικά παρακάτω [11]:

- Το NIS χρειάζεται να γνωρίζει μόνο τα φυσιολογικά κύτταρα (self)
- Το NIS μπορεί να ξεχωρίσει τα φυσιολογικά (self) από τα ξένα κύτταρα (non self)
- Ένα ξένο κύτταρο μπορεί να χαρακτηριστεί σαν επιβλαβές ή μη επιβλαβές
- Τα λεμφοκύτταρα κλωνοποιούνται και μεταλλάσσονται προκειμένου να προσαρμοστούν με τα ξένα κύτταρα που αντιμετωπίζει ο οργανισμός
- Το NIS έχει γρήγορη αντίδραση σε αντιγόνα που ο οργανισμός έχει ήδη αντιμετωπίσει, η οποία οφείλεται στα κύτταρα μνήμης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύονται μερικά από τα υπάρχοντα τεχνητά ανοσοποιητικά συστήματα. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται και εμπνέονται από τα χαρακτηριστικά και τα μοντέλα του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος, τα οποία έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

3.3 Αλγόριθμος για το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα

Οι πιο σημαντικές ικανότητες του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος είναι η εσωτερική λειτουργία και η συνεργασία των ώριμων B- και T-κυττάρων, τα οποία είναι υπεύθυνα για την έκκριση αντισωμάτων σαν μια αντίδραση του συστήματος στα αντιγόνα. Τα T-κύτταρα ωριμάζουν στον θύμο αδένα. Η ικανότητα των ώριμων T-κυττάρων να διακρίνουν μεταξύ των φυσιολογικών και των ξένων κυττάρων κάνει το φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα ικανό να εντοπίζει τα ξένα κύτταρα. Όταν ο υποδοχέας ενός B-κυττάρου δεσμεύσει ένα αντιγόνο, τότε το τελευταίο διαχωρίζεται και μεταφέρεται στην επιφάνεια με ένα MHC μόριο. Ο υποδοχέας του T-κυττάρου δεσμεύει με κάποια συγκεκριμένη έλξη το MHC μόριο στην επιφάνεια του B-κυττάρου. Η έλξη μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα μέτρο του πλήθους των λεμφοκίνων, οι οποίες πρέπει να εκκριθούν από το T-κύτταρο για να κλωνοποιήσει το B-κύτταρο σε ένα κύτταρο πλάσματος που θα είναι ικανό να παράγει αντισώματα.

Η μνήμη του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος για τα αντιγόνα, τα οποία αντιμετωπίζει με μεγάλη συχνότητα, δημιουργείται από τα B-κύτταρα τα οποία συχνά μετατρέπονται σε κύτταρα πλάσματος. Συνεπώς για να μοντελοποιήσουμε ένα τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κάποιες βασικές έννοιες, οι οποίες είναι:

1. Υπάρχουν εκπαιδευμένοι ανιχνευτές (τεχνητά λεμφοκύτταρα) τα οποία εντοπίζουν τα ξένα πρότυπα με κάποια συνάφεια.
2. Το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα ίσως να χρειάζεται ένα καλό απόθεμα από φυσιολογικά και ξένα πρότυπα, έτσι ώστε να εκπαιδεύσει τα τεχνητά λεμφοκύτταρα (ALCs) να αποκτήσουν ανοχή.
3. Πρέπει να μετρηθεί η συνάφεια μεταξύ ενός ALC και ενός προτύπου. Το παραπάνω μέτρο υποδεικνύει σε ποιο βαθμό ένα ALC μπορεί να αναγνωρίσει ένα πρότυπο.

4. Έτσι ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση της συνάφειας η αναπαράσταση των προτύπων και των ALCs πρέπει να έχουν την ίδια δομή.
5. Πρέπει να μετρηθεί η συνάφεια μεταξύ δυο ALCs. Το μέτρο της συνάφειας υποδεικνύει σε ποιο βαθμό ένα ALC συνδέεται με κάποιο άλλο με σκοπό να σχηματίσουν ένα δίκτυο.
6. Το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα διαθέτει μνήμη η οποία δημιουργείται από τα τεχνητά λεμφοκύτταρα, τα οποία συχνά αναγνωρίζουν μη φυσιολογικά πρότυπα.
7. Όταν ένα ALC εντοπίσει μη φυσιολογικά πρότυπα, μπορεί να κλωνοποιηθεί, οι κλώνοι μπορούν να μεταλλαχθούν έτσι ώστε να αποκτήσει μεγαλύτερη ποικιλία στο χώρο των λύσεων.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω έννοιες σαν κατευθυντήρια οδηγία ο ψευδοκώδικας που ακολουθεί αποτελεί πρόταση για τη μοντελοποίηση ενός βασικού τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος. Τα μέρη του αλγορίθμου θα αναλυθούν συνοπτικά παρακάτω [11].

Αλγόριθμος 1. Βασικό τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα

Αρχικοποίησε ένα σύνολο από ALCs σαν τον πληθυσμό C
 Καθόρισε το πρότυπο του αντιγόνου σαν το δείγμα εκμάθησης D_T
Ενώ κάποια συνθήκη δεν είναι αληθής **επανάλαβε**
Για κάθε πρότυπο αντιγόνου $z_p \in D_T$ **επανάλαβε**
 Επίλεξε ένα υποσύνολο των ALCs για έκθεση στο σύνολο των z_p , σαν τον πληθυσμό $S \subseteq C$
Για κάθε ALC $x_i \in S$ **επανάλαβε**
 Υπολόγισε την συνάφεια μεταξύ των z_p και x_i
τέλος
 Επίλεξε ένα υποσύνολο των ALCs με την υψηλότερη συνάφεια σαν τον πληθυσμό $H \subseteq C$
 Προσάρμοσε τα ALCs στο σύνολο H με κάποια μέθοδο επιλογής, η οποία θα βασίζεται στην συνάφεια των αντιγόνων είτε στην συνάφεια του δικτύου που έχει υπολογιστεί μεταξύ των ALCs στο σύνολο H
 Ενημέρωσε το επίπεδο υποκίνησης (stimulation) για κάθε ALC στο σύνολο H
Τέλος
Τέλος

Βήματα αλγορίθμου

1. **Αρχικοποίηση του συνόλου C και καθορισμός του συνόλου D_T :** Ο πληθυσμός μπορεί να αρχικοποιηθεί είτε με τυχαία ALCs είτε με ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του πληθυσμού εκμάθησης. Αν επιλεγεί ο δεύτερος τρόπος αρχικοποίησης το συμπλήρωμα του συνόλου δεδομένων θα καθορίσει το δείγμα εκπαίδευσης D_T .
2. **Συνθήκη τερματισμού για την δομή επανάληψης όσο:** Στα περισσότερα μοντέλα τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος που θα αναπτυχθούν η συνθήκη τερματισμού σχετίζεται με την σύγκλιση σε ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

3. **Επιλογή ενός υποσυνόλου S , από το σύνολο των ALCs:** Το επιλεγμένο υποσύνολο S μπορεί να είναι είτε ολόκληρος ο πληθυσμός P είτε ένα τυχαία επιλεγμένο υποσύνολο ALCs από το P .
4. **Υπολογισμός της συνάφειας των αντιγόνων:** Το παραπάνω μέτρο αναπαριστά την ομοιότητα ή ανομοιότητα μεταξύ ενός ALC και ενός προτύπου αντιγόνου. Οι πιο κοινές μέθοδοι υπολογισμού του παραπάνω μέτρου είναι η ευκλείδεια απόσταση, η απόσταση hamming, και η ομοιότητα συνημίτονου.
5. **Επιλογή ενός υποσυνόλου H από το σύνολο των ALCs:** Σε ορισμένα μοντέλα του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος η επιλογή των ALCs βασίζεται σε ένα προκαθορισμένο κατώφλι συνάφειας.
6. **Υπολογισμός της συνάφειας του δικτύου:** Υπολογίζεται η συνάφεια μεταξύ δυο ALCs. Οι μέθοδοι υπολογισμού είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό της συνάφειας των αντιγόνων. Ένα προκαθορισμένο κατώφλι καθορίζει πότε δυο ή περισσότερα ALCs συνδέονται προκειμένου να σχηματίσουν ένα δίκτυο.
7. **Προσαρμογή των ALCs στο υποσύνολο H :** Η προσαρμογή των ALCs μπορεί να θεωρηθεί σαν η διαδικασία ωρίμανσης του ALC, η οποία μπορεί να είναι είτε εποπτευμένη είτε μη εποπτευμένη. Μερικές από τις μεθόδους επιλογής που θα χρησιμοποιηθούν μπορεί να είναι η αρνητική επιλογή είτε η θετική επιλογή, η επιλογή κλώνων και μερικές εξελικτικές τεχνικές με τελεστές μετάλλαξης. Τα ALCs τα οποία σχηματίζουν ένα δίκτυο μπορούν να επηρεάσουν το ένα το άλλο έτσι ώστε να προσαρμοστούν σε ένα αντιγόνο.
8. **Ενημέρωση της παρακίνησης ενός ALC:** Το επίπεδο της παρακίνησης υπολογίζεται με διαφορετικούς τρόπους στα υπάρχοντα πρότυπα του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος. Σε μερικά από αυτά τα μοντέλα, το επίπεδο παρακίνησης θεωρείται ότι είναι το άθροισμα της συνάφειας των αντιγόνων, το οποίο καθορίζει το επίπεδο των πόρων ενός ALC. Το επίπεδο παρακίνησης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν κριτήριο για την επιλογή των ALCs ως σύνολο μνήμης. Το σύνολο μνήμης περιέχει τα ALCs που πιο συχνά ταιριάζουν με ένα πρότυπο αντιγόνων [18].

3.4 Κλασική άποψη για τα μοντέλα των Τεχνητών Ανοσοποιητικών συστημάτων (AIS)

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα κατά την κλασική άποψη του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος είναι η ικανότητα των ώριμων Τ-κύτταρων, να διακρίνουν μεταξύ των φυσιολογικών και των ξένων κυττάρων. Στη συνέχεια θα αναλυθούν μοντέλα AIS τα οποία είτε βασίζονται στην κλασική άποψη γύρω από το φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα ή εμπνέονται από αυτή. Κατά συνέπεια, τα πρότυπα AIS εκπαιδεύουν τα τεχνητά λεμφοκύτταρα (ALCs) με σκοπό να αποκτήσουν την ικανότητα να διακρίνουν μεταξύ των φυσιολογικών και των μη φυσιολογικών προτύπων. Μια τεχνική γνωστή ως αρνητική επιλογή αναλύεται παρακάτω όπως επίσης και διάφορες άλλες τεχνικές μέτρησης, οι οποίες καθορίζουν το βαθμό ταιριάσματος μεταξύ ενός ALC και ενός φυσιολογικού/ μη φυσιολογικού προτύπου.

3.4.1 Αρνητική επιλογή

Ένα από τα μοντέλα AIS το οποίο βασίστηκε στην κλασική άποψη του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος εισήχθη από τον Forrest [12]. Σε αυτό το κλασικό AIS, ο Forrest, εισήγαγε μια τεχνική εκπαίδευσης γνωστή ως αρνητική επιλογή. Στο μοντέλο, όλα τα πρότυπα και τα ALCs αναπαρίστανται σαν γνωρίσματα με

ονομαστική τιμή ή ως δυαδικές αλληλουχίες. Η συνάφεια μεταξύ ενός ALC και ενός προτύπου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κανόνα αντιστοιχίας r -συνεχής, όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Ο r -συνεχής κανόνας είναι ένας εν μέρει κανόνας ταιριάσματος, δηλαδή ένα ALC εντοπίζει ένα πρότυπο εάν υπάρξουν r συνεχή ή περισσότερα ταιριάσματα στις αντίστοιχες θέσεις. Ορίζουμε ως R το βαθμό συνάφειας για ένα ALC να ανιχνεύσει ένα πρότυπο. Στην εικόνα 10 υπάρχουν επτά συνεχείς αντιστοιχίες μεταξύ του ALC και του προτύπου. Επομένως, εάν $r = 4$, το ALC ταιριάζει με το πρότυπο, εφόσον $r < 7$. Εάν $r > 7$, το ALC δεν ταιριάζει με το πρότυπο. Μια υψηλή τιμή του r υποδεικνύει ισχυρότερη συγγένεια μεταξύ ενός ALC και ενός προτύπου.

ALC	A A B C D G U W J	S W E H U T S	D F E S S T R
Pattern	A H F H E H U D U	S W E H U T S	E F J F J E T

Εικόνα 10. R -συνεχής κανόνας

Μερικά από τα ALCs του μοντέλου αναπαριστούν τα ώριμα Τ-κύτταρα στο φυσικό ανοσοποιητικό σύστημα. Ένα δείγμα εκπαίδευσης των φυσιολογικών προτύπων χρησιμοποιείται για να εκπαιδεύσουν το σύνολο των ALCs χρησιμοποιώντας την τεχνική της αρνητικής επιλογής. Ο αλγόριθμος που ακολουθεί συνοψίζει τη μέθοδο της αρνητικής επιλογής.

Αλγόριθμος 2 Εκπαίδευση των ALCs μέσω της αρνητικής επιλογής

Θέσε τον μετρητή n_a σαν το πλήθος των ALCs τα οποία πρόκειται να εκπαιδευτούν

Δημιούργησε ένα κενό σύνολο ALCs, σαν το σύνολο C

Όρισε το δείγμα εκπαίδευσης των φυσιολογικών προτύπων, σαν D_T

ενώ το μέγεθος του C δεν ισούται με n_a επανάλαβε

Τυχαία δημιούργησε ένα ALC, x_i ;

Ταίριασμα=ψευδής;

για κάθε φυσιολογικό πρότυπο $z_p \in D_T$

αν η συνάφεια μεταξύ των x_i και z_p είναι υψηλότερη από το κατώφλι r **τότε**

Ταίριασμα =αληθές;

διακοπή;

τέλος

τέλος

αν δεν ταιριάζει **τότε**

πρόσθεσε το x_i στο σύνολο C ;

τέλος

Τέλος

Για κάθε τυχαία παραγόμενο ALC, η συγγένεια μεταξύ του ALC και κάθε φυσιολογικού προτύπου στο δείγμα εκπαίδευσης υπολογίζεται. Εάν η συνάφεια μεταξύ οποιουδήποτε φυσιολογικού προτύπου και ενός ALC είναι υψηλότερη από το κατώτατο όριο συνάφειας, r , το ALC απορρίπτεται και ένα νέο ALC παράγεται τυχαία. Η συνάφεια του καινούριου ALC υπολογίζεται σε σχέση με τα φυσιολογικά πρότυπα. Εάν η συνάφεια μεταξύ όλων των φυσιολογικών προτύπων και ενός ALC

είναι χαμηλότερη από το κατώτατο όριο συνάφειας, r , το ALC προστίθεται στο φυσιολογικό σύνολο (self-tolerant set) των ALCs. Κατά συνέπεια, το σύνολο των ALCs επιλέγεται αρνητικά, δηλαδή μόνο τα ALCs με μια υπολογισμένη συνάφεια μικρότερη από το κατώτατο όριο συνάφειας, r , θα συμπεριληφθεί στο σύνολο των ALCs.

Στη συνέχεια, το εκπαιδευμένο, ανεκτικό σύνολο (self-tolerant) ALCs συγκρίνεται με ένα σύνολο δοκιμής φυσιολογικών και μη φυσιολογικών προτύπων. Έπειτα, υπολογίζεται η συνάφεια μεταξύ κάθε προτύπου εκπαίδευσης και του συνόλου των ανεκτικών (self-tolerant set) ALCs. Εάν η υπολογισμένη συνάφεια είναι κάτω από το κατώτατο όριο συνάφειας, r , το πρότυπο ταξινομείται σαν φυσιολογικό πρότυπο. Διαφορετικά, το πρότυπο ταξινομείται σαν μη φυσιολογικό. Το δείγμα εκπαίδευσης παρακολουθείται συνεχώς, ελέγχοντας διαρκώς το σύνολο ALC σε σχέση με το δείγμα εκπαίδευσης για πιθανές τροποποιήσεις. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου της αρνητικής επιλογής είναι η ανάγκη της καλής αναπαράστασης των φυσιολογικών προτύπων. Τέλος, ένα άλλο μειονέκτημα είναι η εξαντλητική αντικατάσταση ενός ALC και κατά τη διάρκεια του ελέγχου με το δείγμα εκπαίδευσης μέχρι το τυχαία παραγμένο ALC να είναι φυσιολογικά ανεκτικό (self tolerant).

3.4.2 Εξελικτικές προσεγγίσεις

Μια διαφορετική προσέγγιση η οποία σχετίζεται με την αρνητική επιλογή προτείνεται από τους Kim και Bentley [13] κατά την οποία τα ALCs δεν δημιουργούνται και ελέγχονται με τυχαίο τρόπο, όπως στην αρνητική επιλογή, αλλά σε αντίθεση χρησιμοποιείται μια εξελικτική διαδικασία η οποία εξελίσσει τα ALCs σε μη φυσιολογικά και επίσης διατηρεί την ποικιλία και τη γενικότητα ανάμεσα στα ALCs. Το μοντέλο των Potter και De Jong [14] εφαρμόζει ένα συνεξελικτικό γενετικό αλγόριθμο για να εξελίσσει τα ALCs προς την επιλεγμένη κλάση των μη φυσιολογικών προτύπων στο δείγμα εκπαίδευσης και ακόμη πιο πέρα από την επιλεγμένη κλάση των φυσιολογικών προτύπων.

Όταν η καταλληλότητα του ALC συνόλου εξελιχθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε όλα τα μη φυσιολογικά πρότυπα και κανένα από τα φυσιολογικά πρότυπα να εντοπίζονται, τα ALCs αναπαριστούν μια περιγραφή της ιδέας. Αν το δείγμα εκπαίδευσης των φυσιολογικών και μη φυσιολογικών προτύπων είναι 'θορυβώδες', το σύνολο των ALC θα εξελιχτεί όταν τα περισσότερα από τα μη φυσιολογικά πρότυπα και λίγα στο πλήθος φυσιολογικά πρότυπα θα εντοπιστούν.

Οι Gonzalez και λοιποί [15] παρουσιάζουν την μέθοδο της αρνητικής επιλογής, η οποία είναι ικανή να εκπαιδεύσει τα ALCs με συνεχή εκτίμηση των φυσιολογικών προτύπων. Τα ALCs εξελίσσονται πέρα από το δείγμα εκπαίδευσης των φυσιολογικών προτύπων και είναι αρκετά διασκορπισμένα μεταξύ τους, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η κάλυψη των μη φυσιολογικών προτύπων, καθώς επιθυμείται η μικρότερη δυνατή επικάλυψη μεταξύ των ALCs.

3.5 Αλγόριθμος επέκτασης κλώνων και επιλογής

Ο αλγόριθμος της επέκτασης κλώνων και επιλογής εμπνέεται από την επιλογή κλώνων και την διαδικασία μετάλλαξης των B-κυττάρων από την στιγμή που το ανοσοποιητικό σύστημα εντοπίσει ένα παθογόνο. Ο ρόλος της διαδικασίας επιλογής

κλώνων είναι η δημιουργία μιας μεγάλης ποσότητας αντισωμάτων που θα ταιριάζουν σε μεγάλο βαθμό με συγκεκριμένα αντιγόνα.

Προσαρμόζοντας την παραπάνω έννοια προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα αλγόριθμο, τα αντισώματα μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι οι πιθανές λύσεις, τα αντιγόνα είναι τα δεδομένα δοκιμής, ενώ ο βαθμός ταιριάσματος μεταξύ ενός αντισώματος και ενός αντιγόνου αναπαριστά την καταλληλότητα ή την ποιότητα της λύσης. Ο στόχος είναι η έναρξη από ένα αρχικό πληθυσμό, η εφαρμογή του αλγορίθμου με το σύνολο των δεδομένων και η επαναληπτική χρήση του αλγορίθμου έτσι ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα των λύσεων στον πληθυσμό. Η μεταφορά της έννοιας της επιλογής κλώνων μπορεί να μετατραπεί σε ένα αλγόριθμο βελτιστοποίησης με μια ποικιλία τρόπων. Μια σύντομη περιγραφή του αλγορίθμου δίνεται παρακάτω [16]:

1. Δημιούργησε ένα τυχαίο πληθυσμό P διανυσμάτων λύσεων (αντισωμάτων).
2. Επίλεξε ένα υποσύνολο F λύσεων από το P , μέσω μιας διαδικασίας επιλογής η οποία οδηγεί σε καλύτερες λύσεις.
3. Για κάθε μέλος F (γονείς), δημιούργησε ένα σύνολο κλώνων, με τέτοιο τρόπο ώστε τα καλύτερα μέλη του F να παράγουν περισσότερα μέλη.
4. Μετάλλαξε κάθε κλώνο, με αντιστροφή αναλογία προς την καταλληλότητα των γονέων, με τέτοιο τρόπο ώστε οι καλύτερες λύσεις να μεταλλάσσονται λιγότερο.
5. Επίλεξε ένα υποσύνολο των καινούριων λύσεων S .
6. Δημιούργησε ένα πλήθος καινούριων τυχαίων λύσεων R .
7. Αντικατέστησε τα χειρότερα μέλη του P με τις καλύτερες λύσεις από τα σύνολα S και R .
8. Επανάλαβε τα βήματα (2)-(7) μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού.

Ο αλγόριθμος επιλογής κλώνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς βελτιστοποίησης ακριβώς όπως και οι εξελικτικοί αλγόριθμοι. Η βασική διαφορά μεταξύ των αλγορίθμων είναι η μεθοδολογία που ακολουθούν έτσι ώστε να βελτιώσουν επαναληπτικά τις λύσεις. Στον πίνακα 1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η αντιστοιχία μεταξύ του αλγορίθμου επιλογής κλώνων και της βελτιστοποίησης [10].

Ανοσοποιητικό σύστημα	
Συστατικό	Αντιστοιχία
Αντίσωμα	Κανόνας, εξίσωση ή πρόγραμμα.
Αντιγόνα	Δεδομένα δοκιμής.
Ταίριασμα αντιγόνου-αντισώματος	Ποιότητα του κανόνα ή του προγράμματος.
Κλωνοποίηση, μετάλλαξη	Δημιουργία ποικιλίας προκειμένου να προκύψουν καλύτερες λύσεις.

Πίνακας 1. Αντιστοιχία μεταξύ της επιλογής κλώνων και της βελτιστοποίησης [10]

Στον παρακάτω πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 2) παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές μεταξύ ενός εξελικτικού αλγορίθμου και ενός αλγορίθμου επιλογής κλώνων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι βασικές διαφορές αφορούν στην τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Όσον αφορά στον αλγόριθμο επιλογής κλώνων, ο μηχανισμός

επιλογής των καταλληλότερων αντισωμάτων βασίζεται στην συνάφεια τους, με τα αντιγόνα. Οι παραδοσιακοί μηχανισμοί επιλογής που χρησιμοποιούνται στους εξελικτικούς υπολογισμούς μπορούν να προσαρμοστούν κατάλληλα έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν και στους αλγορίθμους επιλογής κλώνων. Όσο αφορά στους εξελικτικούς αλγορίθμους, η πιθανότητα να επιλεγεί ένα άτομο καθορίζεται από την καταλληλότητα του, κάτι που μοιάζει με την καταλληλότητα του αντισώματος ή του αντιγόνου.

Έχουν προταθεί διάφορες εκδοχές του αλγορίθμου επιλογής κλώνων και παρουσιάζεται παρακάτω ο αλγόριθμος *clonAlg*, ο οποίος προτείνεται από τον De Castro (2002) και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση προτύπων. Υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές του αλγορίθμου επιλογής κλώνων και μια από αυτές είναι η εκδοχή του *clonAlg*, η οποία εφαρμόζεται στην αναγνώριση προτύπων και δέχεται σαν είσοδο ένα σύνολο προτύπων τα οποία πρόκειται να αναγνωριστούν. Τέλος, άλλη εκδοχή είναι η εκδοχή βελτιστοποίησης, η οποία θεωρεί μια αντικειμενική συνάρτηση που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί [17, 18].

Χαρακτηριστικά	Εξελικτικοί αλγόριθμοι	Αλγόριθμος επιλογής κλώνων
Χώρος λύσεων	Σύνολο χρωμοσωμάτων	Σύνολο αντισωμάτων
Υποψήφια λύση	Χρωμόσωμα	Αντίσωμα
Αναπαράσταση ατόμου	Οποιαδήποτε (αλληλουχία, Πραγματικά διανύσματα κτλ.)	Οποιαδήποτε
Μέγεθος πληθυσμού	Σταθερό	Σταθερό
Συνάρτηση καταλληλότητας	Βασίζεται στην συνάρτηση	Συνάφεια
Τελεστές	Επιλογή χρωμοσωμάτων Μετάλλαξη Διασταύρωση	Επιλογή κλώνων Υπέρ-μετάλλαξη

Πίνακας 2. Σύγκριση των αλγορίθμων επιλογής κλώνων με τους εξελικτικούς αλγορίθμους [10]

3.6 Μοντέλα βασισμένα στην επιλογή κλώνων

Η επιλογή των κλώνων στο τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα είναι η επιλογή ενός συνόλου ALCs το οποίο παρουσιάζει την μεγαλύτερη συνάφεια με ένα μη φυσιολογικό πρότυπο. Στη συνέχεια, τα επιλεγμένα ALCs κλωνοποιούνται και μεταλλάσσονται έτσι ώστε να παρουσιάσουν μεγαλύτερη συνάφεια με το μη φυσιολογικό πρότυπο. Παρακάτω αναλύονται μερικά μοντέλα τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος τα οποία εμπνέονται από την επιλογή κλώνων και παρουσιάζεται ένας ψευδό-αλγόριθμος για κάθε ένα από αυτά τα μοντέλα [13].

3.6.1 CLONALG

Η επιλογή ενός λεμφοκυττάρου από ένα ανιχνευμένο αντιγόνο για κλωνοποίηση ενέπνευσε τη μοντελοποίηση του CLONALG. Οι De Castro και Von Zuben [17, 18] παρουσίασαν το CLONALG σαν ένα αλγόριθμο ο οποίος υλοποιεί μηχανική μάθηση και αναγνώριση προτύπων. Επίσης, όλα τα πρότυπα παρουσιάζονται σαν δυαδικές ακολουθίες.

Η συνάφεια μεταξύ ενός ALC και ενός μη φυσιολογικού προτύπου υπολογίζεται με την μεταξύ τους απόσταση Hamming. Το παραπάνω μέτρο παρέχει μια ένδειξη για την ομοιότητα μεταξύ δύο προτύπων. Για παράδειγμα, όσο μικρότερη η απόσταση τόσο μεγαλύτερη η συνάφεια μεταξύ ενός ALC και ενός μη φυσιολογικού προτύπου.

Όλα τα πρότυπα στο δείγμα εκπαίδευσης αντιμετωπίζονται σαν μη φυσιολογικά πρότυπα. Ο αλγόριθμος 2 συνοψίζει το CLONALG για εφαρμογή σε αναγνώριση προτύπων. Τα μέρη του αλγορίθμου αναλύονται παρακάτω.

Το σύνολο C των ALCs, αρχικοποιείται με n_a τυχαία ALCs. Το σύνολο ALC διαιρείται σε ένα σύνολο μνήμης, M , και ένα σύνολο R με τα υπόλοιπα ALCs. Επομένως, $C = M \cup R$ και $n_{ci} = \text{round}(\frac{\beta \times n_h}{i})$. Η αρχική υπόθεση στον αλγόριθμο CLONALG είναι ότι υπάρχει ένα ALC μνήμης για κάθε πρότυπο προς αναγνώριση στο σύνολο DT .

Αλγόριθμος 3 CLONALG αλγόριθμος για αναγνώριση προτύπων

$t = t_{max}$;

Καθόρισε τα πρότυπα αντιγόνου sas το δείγμα εκπαίδευσης DT ;

Αρχικοποίησε ένα σύνολο n_a τυχαία ALCs σαν τον πληθυσμό C ;

Επίλεξε ένα υποσύνολο $n_m = |DT| / \text{ALCs}$, σαν τον πληθυσμό $M \subseteq C$;

Επίλεξε ένα υποσύνολο $n_a - n_m$ των ALCs, σαν τον πληθυσμό $R \subseteq C$;

Όσο $t > 0$ επανάλαβε

Για κάθε πρότυπο αντιγόνου $z_p \in DT$ επανάλαβε

Υπολόγισε την συνάφεια μεταξύ του z_p και κάθε ALC στο C ;

Επίλεξε n_h ALCs με την υψηλότερη συνάφεια με το z_p από το C σαν το υποσύνολο H ;

Ταξινομήσε τα ALCs του συνόλου H με αύξουσα σειρά, με βάση τη συνάφεια των ALCs ;

Δημιούργησε το W σαν το σύνολο κλώνων ALC του H ;

Δημιούργησε το W' σαν το σύνολο των μεταλλαγμένων κλώνων για κάθε ALC στο W ;

Υπολόγισε τη συνάφεια μεταξύ των z_p και κάθε ALC στο σύνολο W' ;

Επίλεξε το ALC με την υψηλότερη συνάφεια στο W' σαν \hat{x} ;

Εισήγαγε το \hat{x} στο M στη θέση p ;

Αντικατέστησε τα n_l ALCs με τη χαμηλότερη συνάφεια στο R με τυχαία ALCs;

τέλος

$t = t - 1$;

Τέλος

Κάθε πρότυπο z_p , σε τυχαία θέση, p , στο DT , εμφανίζεται στο C . Υπολογίζεται η συνάφεια μεταξύ των z_p και κάθε ALC στο C . Ένα υποσύνολο n_h των ALCs με την υψηλότερη συνάφεια επιλέγεται από το C σαν το υποσύνολο H . Το σύνολο n_h των ALCs στη συνέχεια ταξινομείται σε αύξουσα σειρά σε σχέση με τη συνάφεια με το z_p . Κάθε ALC στο ταξινομημένο σύνολο H κλωνοποιείται ανάλογα με την

υπολογισμένη συνάφεια με το z_p και προστίθεται στο σύνολο W . Το πλήθος των κλωνοποιημένων, n_{ci} , για κάθε ALC, x_i , στην θέση i στο ταξινομημένο σύνολο H , προσδιορίζεται ως εξής :

$n_{ci} = \text{round}(\frac{\beta \times n_h}{i})$, όπου β είναι ένας συντελεστής και η συνάρτηση round επιστρέφει τον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό.

Τα ALCs στο κλωνοποιημένο σύνολο, W , μεταλλάσσεται με ένα ποσοστό μεταλλαγής που είναι αντιστρόφως ανάλογο της υπολογισμένης συνάφειας, δηλαδή μια υψηλότερη συνάφεια συνεπάγεται ένα χαμηλότερο ποσοστό μεταλλαγής. Οι μεταλλαγμένοι κλώνοι στο W προστίθενται σε ένα σύνολο μεταλλαγμένων κλώνων, W' . Τέλος, υπολογίζεται η συνάφεια μεταξύ των μεταλλαγμένων κλώνων στο σύνολο W' και του επιλεγμένου συνόλου εκπαίδευσης, z_p .

Το ALC με την υψηλότερη υπολογισμένη συνάφεια στο σύνολο W' , \bar{x} , αντικαθιστά το ALC στη θέση, p , στο σύνολο M , εάν η συνάφεια \bar{x} είναι υψηλότερη από τη συνάφεια του ALC στο σύνολο M . Τα τυχαία παραγμένα ALCs αντικαθιστούν τα n_1 ALCs με τη χαμηλότερη συνάφεια στο σύνολο R . Η διαδικασία εκμάθησης επαναλαμβάνεται, μέχρι να επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός γενεών, t_{\max} . Μια τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου CLONALG έχει εφαρμοστεί στην βελτιστοποίηση της πολύμορφης λειτουργίας (multi-modal function optimization).

3.6.2 Δυναμική επιλογή κλώνων

Σε μερικές περιπτώσεις το πρόβλημα που πρέπει να βελτιστοποιηθεί αποτελείται από φυσιολογικά πρότυπα τα οποία τροποποιούνται με το πέρασμα του χρόνου. Με σκοπό να εξεταστούν τέτοιου τύπου προβλήματα, εισήχθη ο δυναμικός κλωνικός αλγόριθμος επιλογής (DCS) από τους Kim και Bentley [13]. Ο δυναμικός αλγόριθμος επιλογής κλώνων είναι βασισμένος στο AIS, ο οποίος προτείνεται από τον Hofmeyr [19]. Η βασική ιδέα είναι η ύπαρξη τριών διαφορετικών πληθυσμών ALCs: των ανώριμων, των ώριμων και των πληθυσμών μνήμης.

Οι Kim και Bentley [13] μελέτησαν την επίδραση τριών παραμέτρων όσον αφορά στην προσαρμοστικότητα του μοντέλου στις αλλαγές των προτύπων. Αυτές οι παράμετροι ήταν η περίοδος ανεκτικότητας, το κατώτατο όριο ενεργοποίησης και ο κύκλος ζωής. Η περίοδος ανεκτικότητας είναι ένα κατώτατο όριο του αριθμού των γενεών που το ALCs μπορεί να γίνει αυτό-ανεκτικό (self-tolerant). Το κατώτατο όριο ενεργοποίησης χρησιμοποιείται ως μέτρο για να καθοριστεί εάν ένα ώριμο ALC αντιμετώπισε τον ελάχιστο αριθμό αντιστοιχιών αντιγόνων για να είναι σε θέση να γίνει ένα ALC μνήμης. Η παράμετρος, κύκλος ζωής δείχνει το μέγιστο αριθμό γενεών για τον οποίο ένα ώριμο ALC επιτρέπεται να είναι στο σύστημα.

Αν ο κύκλος ζωής του ώριμου ALC ταυτίζεται με την προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου του κύκλου ζωής, το ώριμο ALC διαγράφεται από το σύστημα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων με διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους υποδεικνύουν ότι μια αύξηση στο κύκλο ζωής με μια μείωση στο κατώτατο όριο ενεργοποίησης οδηγούσε το μοντέλο σε αύξηση της πιθανότητας σωστής ανίχνευσης των πραγματικών μη φυσιολογικών προτύπων. Αύξηση της περιόδου ανεκτικότητας είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση της λανθασμένης ανίχνευσης των φυσιολογικών προτύπων, με την προϋπόθεση ότι τα φυσιολογικά πρότυπα είναι σταθερά.

Μολονότι το DCS θα μπορούσε σταδιακά να μάθει τη δομή των φυσιολογικών και μη φυσιολογικών προτύπων, στερείται της δυνατότητας να εκμάθει οποιαδήποτε αλλαγή στα απαραίτητα φυσιολογικά πρότυπα. Τα ALCs μνήμης στον αλγόριθμο DCS έχουν άπειρη διάρκεια ζωής. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα παραλείφθηκε στο εκτεταμένο DCS με την αφαίρεση των ALCs μνήμης που δεν ήταν μόνο-ανεκτικά (self tollerant) στα πρόσφατα εισαχθέντα φυσιολογικά πρότυπα [13].

Με την εισαγωγή της υπέρ-μετάλλαξης στα διαγραμμένα ALCs μνήμης έγινε μια περαιτέρω επέκταση στο DCS [13]. Τα διαγραμμένα ALCs μνήμης μεταλλάσσονται για να τροφοδοτήσουν τον ανώριμο πληθυσμό ανιχνευτών. Έχοντας ως δεδομένο ότι αυτά τα διαγραμμένα ALCs μνήμης περιέχουν πληροφορία, η οποία ήταν αρμόδια για να τους παρέχει την κατάσταση μνήμης, η εφαρμογή της μετάλλαξης σε αυτά τα ALCs θα διατηρήσει και θα τελειοποιήσει το σύστημα, ενισχύοντας τον αλγόριθμο με ήδη εκπαιδευμένα ALCs.

3.6.3 Πολύ-επίπεδο AIS

Οι Knight και Timmis [20] πρότειναν ένα νέο μοντέλο, εμπνευσμένο από την επιλογή κλώνων, το οποίο αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα έτσι ώστε να εξομαλύνει τις ανεπάρκειες του AINE (Artificial Immune Network) μοντέλου. Τα καθορισμένα επίπεδα αλληλεπιδρούν για να προσαρμοστούν και να μάθουν τη δομή των παρουσιαζόμενων προτύπων αντιγόνων. Το μοντέλο ακολουθεί τη δομή του AIS και οι βασικές απαιτήσεις για ένα AIS είναι η αναπαράσταση των συστατικών του (όπως τα B-κύτταρα), η αξιολόγηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των συστατικών ή του περιβάλλοντός τους (συνάφεια) και η προσαρμοστικότητα του μοντέλου σε ένα δυναμικό περιβάλλον.

Το προτεινόμενο πολύ-επίπεδο AIS αποτελείται από τα ακόλουθα επίπεδα: το επίπεδο των ελεύθερων-αντισωμάτων (F), το επίπεδο των B-κυττάρων (B) και το επίπεδο μνήμης (M). Το σύνολο των προτύπων εκπαίδευσης, DT, θεωρείται ότι είναι το αντιγόνο. Κάθε επίπεδο έχει ένα κατώτατο όριο συνάφειας (a_F, a_B, a_M) και ένα κατώτατο όριο επιβίωσης ($\varepsilon_F, \varepsilon_B, \varepsilon_M$). Το κατώτατο όριο επιβίωσης υπολογίζεται σε σχέση με το χρονικό διάστημα δεδομένου ότι ένα κύτταρο διεγείρεται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Εάν το κατώτατο όριο επιβίωσης δεν υπερβαίνει αυτό το υπολογισμένο χρονικό διάστημα, το κύτταρο πεθαίνει και αφαιρείται από τον πληθυσμό του συγκεκριμένου επιπέδου. Το κατώτατο όριο συνάφειας καθορίζει εάν ένα αντιγόνο ενώνεται με μια οντότητα σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Η συνάφεια, f_A , μεταξύ ενός προτύπου αντιγόνων και μιας οντότητας σε ένα επίπεδο υπολογίζεται μέσω της ευκλείδειας απόστασης. Ο αλγόριθμος 3 συνοψίζει το πολύ-επίπεδο AIS. Τα διαφορετικά μέρη του αλγορίθμου αναλύονται παρακάτω.

Ένα αντιγόνο, z_p , εισβάλλει αρχικά στο επίπεδο των ελεύθερων αντισωμάτων, F. Στο παραπάνω στρώμα, το πρότυπο αντιγόνων παρουσιάζεται έπειτα στα n_f ελεύθερα αντισώματα. Το πλήθος των ταιριασμάτων των ελεύθερων αντισωμάτων αποθηκεύεται στη μεταβλητή n_b . Έπειτα το αντιγόνο, z_p , εισέρχεται στο επίπεδο των B-κυττάρων, B, και παραμένει σε αυτό το επίπεδο έως ότου να δεσμευτεί από ένα από τα B-κύτταρα. Μετά από τη σύνδεση, το υποκινημένο B-κύτταρο, u_k , παράγει έναν κλώνο, u_k εάν το επίπεδο υποκίνησης υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο υποκίνησης, γ_B . Το επίπεδο υποκίνησης βασίζεται στο πλήθος των

συνδέσεων των ελεύθερων αντισωμάτων, n_b , όπως υπολογίζεται στο επίπεδο των ελεύθερων αντισωμάτων. Ο κλώνος έπειτα μεταλλάσσεται, u_k' , και προστίθεται στο στρώμα των B-κυττάρων. Το υποκινημένο B-κύτταρο, u_k , παράγει τα ελεύθερα αντισώματα τα οποία είναι μεταλλαγμένες εκδόσεις του αρχικού B-κυττάρου. Ο αριθμός των ελεύθερων αντισωμάτων που παράγονται από ένα B-κύτταρο καθορίζεται ως εξής:

$$f_F(z_p, u_k) = (a_{\max} - f_a(z_p, u_k)) \times a$$

Όπου F_f είναι το πλήθος των αντισωμάτων τα οποία προστίθενται στο επίπεδο των ελεύθερων αντισωμάτων, a_{\max} είναι η μέγιστη δυνατή απόσταση μεταξύ ενός B-κυττάρου και ενός προτύπου αντιγόνου στο χώρο δεδομένων, $f_a(z_p, u_k)$ είναι η συνάφεια μεταξύ ενός αντιγόνου, z_p , και ενός B-κυττάρου, u_k , και a είναι μια θετική μεταβλητή.

Αν ένα αντιγόνο δεν ταιριάζει με κανένα από τα B-κύτταρα ένα καινούριο B-κύτταρο, δημιουργείται με την ίδια αναπαράσταση με το αντιγόνο z_p . Το καινούριο B-κύτταρο προστίθεται στο επίπεδο των B-κυττάρων με αποτέλεσμα την αύξηση της ποικιλίας των αντιγόνων. Το καινούριο B-κύτταρο u_{new} , επίσης παράγει μεταλλαγμένα ελεύθερα αντισώματα, τα οποία προστίθενται στο επίπεδο των ελεύθερων αντισωμάτων.

Το τελικό επίπεδο M , αποτελείται μόνο από τα κύτταρα μνήμης και αποκρίνεται μόνο σε καινούρια κύτταρα μνήμης. Ο κλώνος \tilde{u}_k εμφανίζεται σαν ένα καινούριο κύτταρο μνήμης στο επίπεδο μνήμης, M . Το κύτταρο μνήμης με την μικρότερη συγγένεια στο $\square \tilde{u}_k$ επιλέγεται σαν v_{min} . Αν η συνάφεια μεταξύ των \tilde{u}_k και v_{min} είναι μικρότερη από το προκαθορισμένο κατώφλι μνήμης, a_M , και η συνάφεια του \tilde{u}_k είναι μικρότερη από τη συνάφεια του v_{min} με το αντιγόνο z_p (αυτή ήταν η αιτία της δημιουργίας του νέου B-κυττάρου, $\square \tilde{u}_k$), τότε το v_{min} αντικαθίσταται από το καινούριο κύτταρο μνήμης \tilde{u}_k . Αν η συνάφεια μεταξύ των \tilde{u}_k και v_{min} είναι υψηλότερη από το προκαθορισμένο κατώφλι μνήμης, a_M το καινούριο κύτταρο μνήμης \tilde{u}_k προστίθεται στο επίπεδο μνήμης.

Αλγόριθμος 4 Ένας πολύ-επίπεδος AIS αλγόριθμος

Καθόρισε τα πρότυπα αντιγόνων σαν το δείγμα εκπαίδευσης D_T

Για κάθε πρότυπο αντιγόνου $z_p \in D_T$ **επανάλαβε**

$n_b = 0$;

$b_{cell_bind} = \text{false}$;

Επίλεξε τυχαία n_f' ελεύθερα αντισώματα από το σύνολο F , υποσύνολο E

Για κάθε ελεύθερο αντίσωμα $y_j \in E$ **επανάλαβε**

Υπολόγισε την συνάφεια $f_a(z_p, y_j)$

Αν $f_a(z_p, y_j) < a$ **τότε**

n_b++ ;

Αφαίρεσε το ελεύθερο αντίσωμα y_j από το σύνολο F ;

Τέλος

Τέλος

Για κάθε τυχαία επιλεγμένο B-κύτταρο u_k στην θέση k στο σύνολο των B-

κύτταρων, B επανάλαβε

Υπολόγισε την συνάφεια $f_a(z_p, u_k)$

Αν $f_a(z_p, u_k) < a$ **τότε**

B_cell_bind=true;

Break;

Τέλος

Τέλος

Αν δεν υπάρχει ταίριασμα **τότε**

Αρχικοποίησε το καινούριο B-κύτταρο, u_{new} , με το z_p και πρόσθεσε το B-κύτταρο στο B

Δημιούργησε $f_F(z_p, u_{new})$ ελεύθερα αντισώματα και πρόσθεσε τα στο F

Τέλος

Αλλιώς

Δημιούργησε $f_F(z_p, u_k)$ ελεύθερα αντισώματα και πρόσθεσε τα στο F
Ενημέρωσε το επίπεδο παρακίνησης του u_k προσθέτοντας το n_b

Αν το επίπεδο παρακίνησης του $u_k \geq \gamma_B$ **τότε**

Κλωνοποίησε το B-κύτταρο u_k , σαν \widetilde{u}_k

Μετάλλαξε το \widetilde{u}_k σαν u_k''

Πρόσθεσε το u_k' στο σύνολο των B-κυττάρων, B

Επίλεξε το κύτταρο μνήμης v_{min} από το σύνολο M, σαν το κύτταρο μνήμης με την μικρότερη συνάφεια f_a σε σχέση με το

\widetilde{u}_k

Αν $f_a(\widetilde{u}_k, v_{min}) < a_M$ **τότε**

Πρόσθεσε το \widetilde{u}_k στο σύνολο μνήμης M

Τέλος

Αλλιώς

Αν $f_a(z_p, \widetilde{u}_k) < f_a(z_p, v_{min})$ **τότε**

Αντικατέστησε το κύτταρο μνήμης v_{min} με τον κλώνο \widetilde{u}_k στο σύνολο μνήμης M

Τέλος

Τέλος

Τέλος

Τέλος

Τέλος

Για κάθε κύτταρο x_i , στο σύνολο $F \cup B \cup M$ επανάλαβε

Αν ο χρόνος επιβίωσης του $x_i > \varepsilon_{F,B,M}$ **τότε**

Αφαίρεσε το x_i από το αντίστοιχο σύνολο

Τέλος

Τέλος

Κεφάλαιο 4. Το πρόβλημα προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής (permutation flowshop scheduling problem) (PFSP)

4.1 Εισαγωγή

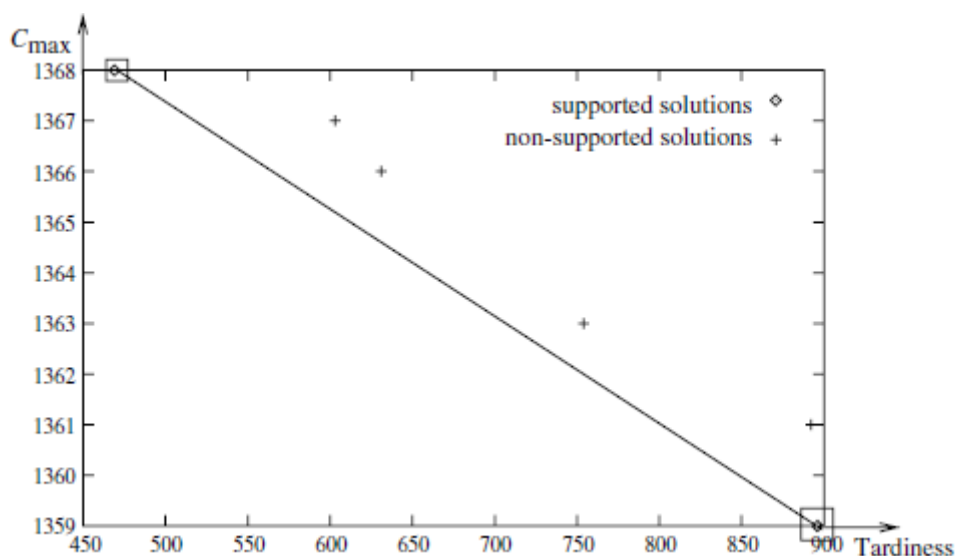
Παρακάτω αναλύονται ορισμένα προβλήματα, τα οποία είναι παρόμοια με το πρόβλημα που επιλύεται στην παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μία ιστορική αναδρομή των προβλημάτων αυτών, δηλαδή ποιοι προσπάθησαν να τα λύσουν και με ποιους αλγόριθμους. Αρχικά, αναφέρονται τα πολυκριτήρια προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται μία ιστορική αναδρομή και στο πρόβλημα που επιλύεται στην παρούσα εργασία.

4.2 Πολυκριτήρια προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης (MOPs)

Στην πραγματικότητα, ένα μεγάλο μέρος των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι πολυκριτήρια. Στην προσπάθεια να λυθούν πολυκριτήρια προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης (MOPs), πολλές μέθοδοι μεταφέρουν το στόχο διάνυσμα σε ένα ενιαίο στόχο, και βρίσκουν μόνο μία λύση. Εδώ και πολλά χρόνια, το ενδιαφέρον σχετικά με την περιοχή MOPs μεγάλωσε με προσεγγίσεις Pareto, όπου η σειρά των λύσεων έγινε με τον μέγιστο συμβιβασμό.

Πολλοί ευρετικοί μέθοδοι υπάρχουν για να λύσουν πολυκριτήρια, ιδίως δυκριτήρια προβλήματα. Υπάρχουν δύο τύποι λύσεων για τις προσεγγίσεις Pareto :

1. «Υποστηρικτικές» λύσεις, οι οποίες είναι λύσεις Pareto που βρίσκονται στην κυρτή περιοχή στο χώρο του κριτηρίου.
2. «Μη υποστηρικτικές» λύσεις, οι οποίες είναι λύσεις Pareto αλλά δεν βρίσκονται στην κυρτή περιοχή στο χώρο του κριτηρίου.



*Εικόνα 10. Αποτέλεσμα του προβλήματος 20*5 No.2 [22]*

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η διάκριση ανάμεσα στις υποστηρικτικές και μη υποστηρικτικές λύσεις είναι σχετική για τα μη κυρτά προβλήματα και ιδιαίτερα για τα συνδυαστικά προβλήματα.

Η σειρά των υποστηρικτικών λύσεων μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας γραμμικές ομαδοποιήσεις των κριτηρίων [21]. Ως εκ τούτου, λύνοντας το δυκριτήριο πρόβλημα με διαφορετικό τρόπο, τα συγκεντρωτικά στοιχεία μπορούν να μειώσουν όλες τις υποστηρικτικές λύσεις, αλλά όχι τις μη υποστηρικτικές. Εξαιτίας του παραπάνω, οι Ulungu και Teghem υποστήριξαν ότι η μέθοδος των δύο φάσεων (two-phase method) (TPM) λύνει προβλήματα δύο κριτηρίων [22].

Από τα παραπάνω φαίνεται λοιπόν, ότι είναι πιο εύκολο να βρεθούν οι υποστηρικτικές λύσεις. Επομένως, όλο το ενδιαφέρον πηγάει στις μη υποστηρικτικές λύσεις. Η εικόνα 1 παρουσιάζει την σπουδαιότητα των μη υποστηρικτικών λύσεων. Αυτό το παράδειγμα είναι ένα αποτέλεσμα για μια δυκριτήρια μετάθεση παραγωγής ροής με 20 δουλειές και 5 μηχανές, όπου πρέπει να ελαχιστοποιηθούν τα C_{\max} και T . Εδώ, υπάρχουν μόνο δύο υποστηρικτικές λύσεις, οι ακραίες. Έτσι, για να υπάρχει ένας καλός συμβιβασμός μεταξύ των δύο κριτηρίων, πρέπει να διαλέξουμε μία από τις μη υποστηρικτικές λύσεις.

Παρακάτω θα αναλυθούν ορισμένα προβλήματα ροής με ελαχιστοποίηση του κριτηρίου **makespan**, μιας και στην παρούσα εργασία το πρόβλημα που επιλύθηκε είναι παρόμοιο.

4.3 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου **makespan** στο πρόβλημα συνεχούς ροής PFSR

Ένα από τα πιο καλά μελετημένα προβλήματα προγραμματισμού είναι το πρόβλημα παραγωγής συνεχούς ροής (FSP). Στο FSP, υπάρχει ένα σύνολο $N = \{1, \dots, n\}$, όπου n οι ανεξάρτητες εργασίες που πρέπει να υποστούν επεξεργασία σε ένα σύνολο $M = \{1, \dots, m\}$, όπου m ο αριθμός των μηχανών. Κάθε εργασία j , με $j \in N$, απαιτεί ένα συγκεκριμένο σταθερό, μη αρνητικό χρόνο επεξεργασίας p_{ij} σε κάθε μηχανή i , με $i \in M$. Στην παραγωγή συνεχούς ροής, όλες οι n εργασίες πρέπει να υποστούν επεξεργασία στις m μηχανές με την ίδια σειρά, δηλαδή οι εργασίες ακολουθούν την ίδια σειρά μηχανών ξεκινώντας από τη μηχανή 1 και καταλήγοντας στη μηχανή m . Ο στόχος είναι να βρεθεί μια σειρά επεξεργασίας των εργασιών, έτσι ώστε ένα δεδομένο κριτήριο να βελτιστοποιηθεί. Το κριτήριο που μελετάται πιο συχνά στη βιβλιογραφία είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης της αλληλουχίας παραγωγής, η οποία ονομάζεται **makespan** (C_{\max}). Μια κοινή απλούστευση στον προγραμματισμό του προβλήματος συνεχούς ροής είναι να αποφευχθεί η δουλειά στην ακολουθία, δηλαδή η ακολουθία επεξεργασίας για την πρώτη μηχανή να διατηρείται σε όλες τις υπόλοιπες μηχανές. Το πρόβλημα που προκύπτει ονομάζεται πρόβλημα μετάθεσης συνεχούς ροής (PFSP) με ελαχιστοποίηση του κριτηρίου **makespan** και συμβολίζεται ως **F / pmu / C_{max}** (Pinedo, 2002) [23]. Υπάρχουν $n!$ πιθανές ακολουθίες και το πρόβλημα είναι γνωστό ότι είναι NP-πλήρες (**NP-complete**) (Rinnooy Kan, 1976) [24].

Το πρόβλημα PFSP έχει γίνει μία πολύ δραστήρια ερευνητική περιοχή για τις ευρετικές και μεθευρετικές τεχνικές, κυρίως λόγω της δυσκολίας που αντιμετωπίζουν οι ακριβείς μέθοδοι για την επίλυση μεσαίων ή μεγάλων περιπτώσεων.

Στην πρωτοποριακή εργασία του Johnson (1954) [25], ο συντάκτης πρότεινε έναν απλό κανόνα για να επιτύχει τις βέλτιστες ακολουθίες για το πρόβλημα PFSP με δύο μηχανές. Αυτό το έργο δημιούργησε σημαντικό ενδιαφέρον για το πρόβλημα PFSP και ακολούθησαν αρκετές προσπάθειες για την επίλυση του προβλήματος PFSP με περισσότερες από δύο μηχανές. Μεταγενέστερες μελέτες είναι μεταξύ άλλων μία μελέτη για τον ευρετικό CDS από τους Campbell και άλλους (1970) [26] και μία για τους κατασκευαστικούς και μεθευρετικούς αλγόριθμους από τον Dannenbring (1977) [27]. Ο ευρετικός NEH από τους Nawaz και άλλους (1983) [28] θεωρείται ως η καλύτερη επίδοση ευρετικής μεθόδου (βλέπε τους Turner και Booth, 1987 ή τους Ruiz και Maroto, 2005) [29,30]. Δεν υπάρχουν σαφή αποδεικτικά στοιχεία για την υποστήριξη της ιδέας ότι έχουν εμφανιστεί καλύτεροι ευρετικοί αλγόριθμοι από τότε. Ωστόσο, υπάρχει μεγάλος αριθμός από πολλές πρόσφατες, ενδιαφέρουσες προτάσεις, όπως είναι ο ευρετικός αλγόριθμος τοπικής αναζήτησης του Suliman (2000) [31] ή η μελέτη του ευρετικού NEH από τους Framinan και άλλους (2003) [32], η οποία εξετάζει αρκετές παρατάσεις του αλγόριθμου NEH όταν αντιμετωπίζει τους άλλους στόχους από το C_{max} .

Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι για το πρόβλημα PFSP εμφανίστηκαν πολύ αργότερα από ό,τι οι αντίστοιχοι ευρετικοί. Ανάμεσα στις αρχικές προσεγγίσεις βρίσκουμε τον αλγόριθμο της προσομοιωμένης απόπτωσης των Osman και Potts (1989) [33], ο οποίος είναι αρκετά απλός. Ο λόγος είναι ότι χρησιμοποιεί μια σταθερή θερμοκρασία και εισάγεται σε μια γειτονιά μέσω μιας διαδικασίας προετοιμασίας με σκοπό την προτεραιότητα εξυπηρέτησης του προηγούμενου αντικειμένου. Ο αλγόριθμος αναζήτησης tabu των Widmer και Hertz (1989) [34], γνωστός ως **SPIRIT**, αποτελείται από δύο φάσεις, όπου στην πρώτη λαμβάνεται μια πρώτη λύση με βάση το Ανοιχτό Πρόβλημα του Περιοδεύοντα Πωλητή (OTSP). Η δεύτερη φάση είναι μια απλή αναζήτηση tabu που λειτουργεί με την ανταλλαγή γειτονιάς. Άλλοι αξιοσημείωτοι αλγόριθμοι αναζήτησης tabu προτάθηκαν από τους Taillard (1990) [35] και Reeves (1993) [36]. Αυτοί οι δύο αλγόριθμοι εισήγαγαν μία γειτονιά και χρησιμοποίησαν τους ευρετικούς NEH για την απόκτηση της αρχικής λύσης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι για την επίλυση του προβλήματος PFSP μελετήθηκαν από τους Chen και άλλους (1995) [37], Reeves (1995) [38] ή πιο πρόσφατα από τους Wang και Zheng (2003) [39] και τους Aldowaisan και Allahvedi (2003) [40]. Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι η προετοιμασία του πληθυσμού δεν είναι τυχαία, όπως σε πολλούς άλλους γενετικούς αλγόριθμους. Στην περίπτωση αυτή, ο πληθυσμός περιέχει τα άτομα που προέρχονται από την εφαρμογή ορισμένων από των παραπάνω ευρετικών αλγορίθμων, συμπεριλαμβανομένων των αλγορίθμων NEH, καθώς και τυχαίες παραλλαγές. Άλλη μελέτη περιλαμβάνει τον επαναλαμβανόμενο αλγόριθμο της τοπικής αναζήτησης από τον Stützle (1998) [41] ή τον πρόσφατο αλγόριθμο βελτιστοποίησης της αποικίας μυρμηγκιών από τους

Chandrasekharan και Ziegler (2004) [42]. Αυτοί οι δύο τελευταίοι αλγόριθμοι βασίζονται επίσης σε μία αρχικοποίηση του αλγόριθμου NEH.

Όλα τα παραπάνω έργα έχουν κάτι κοινό και αυτό είναι ότι οι αλγόριθμοι που προτείνονται είναι εύκολο να κωδικοποιηθούν και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα μπορούν να αναπαραχθούν εύκολα. Επιπλέον, πολλοί από τους παραπάνω αλγόριθμους είναι εύκολα προσαρμόσιμοι σε άλλα ροϊκά περιβάλλοντα, όπως των αλγόριθμων συνεχούς ροής με σειρά που εξαρτάται από το χρόνο εγκατάστασης ή ακόμα και περίπλοκων υβριδικών αλγόριθμων συνεχούς ροής (βλέπε Ruiz και άλλοι, 2005 ή Ruiz και Maroto, 2006) [43,44]. Επιπλέον, υπάρχει μια σειρά από ισχυρές μεθόδους για το πρόβλημα PFSP, συνήθως με τη μορφή υψηλής επεξεργασίας ή με υβριδικές τεχνικές. Ορισμένα παραδείγματα είναι η πορεία με βάση τη μέθοδο (path-based method) του Werner (1993) [45], ο γνωστός αλγόριθμος αναζήτησης tabu των Nowicki και Smutnicki (1996) , ο πολύ πρόσφατος αλγόριθμος αναζήτησης tabu των Grabowski και Wodecki (2004) ή οι υβριδικές τεχνικές όπως ο γενετικός αλγόριθμος με την πορεία επανασύνδεσης των Reeves και Yamada (1998), ο γενετικός αλγόριθμος αναζήτησης με την τοπική αναζήτηση ή η προσομοιωμένη απόπτηση των Murata και άλλων (1996), ο γενετικός αλγόριθμος με την τοπική αναζήτηση των Ruiz και άλλων (2006), η αναζήτηση tabu και η προσομοιωμένη απόπτηση των Moccellini και dos Santos (2000), και η παράλληλη προσομοιωμένη απόπτηση των Wodecki και Bo_zejko (2002). Μερικοί από αυτούς τους αλγόριθμους παρέχουν άριστα αποτελέσματα και αποτελούν τις καλύτερες επιλογές των διαθέσιμων μεθόδων. Ωστόσο, έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα: είναι πολύ εξελιγμένοι και για την εφαρμογή τους είναι απαραίτητη μια επίπονη κωδικοποίηση. Επιπλέον, λόγω των περιορισμένων συχνά περιγραφών που περιλαμβάνονται στις αρχικές εργασίες, συχνά δεν είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένας λειτουργικός αλγόριθμος που να δείχνει παρόμοια απόδοση, εκτός αν οι συντάκτες ενημερώσουν για τις λεπτομέρειες ή παρέχεται ο πηγαίος κώδικας. Τέλος, τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο πρωτότυπο έργο επιτυγχάνονται μετά από πολλές αλλαγές και διαφορές ταχύτητας που συχνά δεν εξηγείται λεπτομερώς στον αναγνώστη. Πολλές από αυτές τις μεθόδους εκμεταλλεύονται ειδικά χαρακτηριστικά των προβλημάτων PFSP, τα οποία σπάνια εφαρμόζονται σε επεκτάσεις του προβλήματος αυτού. Για παράδειγμα, η κρίσιμη έννοια που χρησιμοποιείται στην πορεία (critical path concept) των Nowicki και Smutnicki (1996), των Reeves και Yamada (1998) ή των Wodecki και Grabowski (2004) δεν πραγματοποιείται, όταν θεωρούνται στα προβλήματα συνεχούς ροής άλλες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα η ακολουθία που εξαρτάται από το χρόνο εγκατάστασης.

Μια επίκαιρη αναθεώρηση των ευρετικών και μεθευρετικών αλγορίθμων έγινε από τους Ruiz και Maroto (2005). Αρκετές πρόσφατες μεθευρετικές τεχνικές παρέχουν άριστα αποτελέσματα σε αποδεκτό χρόνο υπολογισμού, αλλά μια πιθανή κριτική θα μπορούσε να είναι η υπερβολική πολυπλοκότητα ορισμένων από τις προτεινόμενες μεθόδους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μερικοί αλγόριθμοι , είναι τόσο περίπλοκοι ώστε μια ανεξάρτητη κωδικοποίηση είναι απίθανο να λάβει την ίδια

αποτελεσματικότητα ή αποδοτικότητα. Επιπλέον, ορισμένοι αλγόριθμοι εκμεταλλεύονται έντονα, συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος PFSP που δεν υπάρχουν ή δεν μπορούν να αξιοποιηθούν σε άλλες παραλλαγές παραγωγής συνεχούς ροής [46].

4.4 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο γενικό πρόβλημα συνεχούς ροής (flowshop) (n/m/Cmax)

Το γενικό πρόβλημα συνεχούς ροής, το οποίο συμβολίζεται ως **n/m/Cmax** στη βιβλιογραφία, περιλαμβάνει n εργασίες, στις οποίες κάθε μία απαιτεί λειτουργίες σε m μηχανές, με την ίδια ακολουθία στις μηχανές αυτές. Ο χρόνος επεξεργασίας για κάθε λειτουργία είναι p_{ij} , όπου $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ συμβολίζεται μία εργασία και $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ μία μηχανή. Το πρόβλημα είναι να προσδιοριστεί η αλληλουχία αυτών των n εργασιών που δημιουργούν την ελαχιστοποίηση στο κριτήριο **makespan** με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει προτίμηση των εργασιών. Στην απλούστερη περίπτωση, όλες οι διαθέσιμες εργασίες υπάρχουν και είναι έτοιμες να ξεκινήσουν την ώρα μηδέν και οι χρόνοι εγκατάστασης των μηχανών είναι ακολουθίες ανεξάρτητες και περιλαμβάνονται στο p_{ij} . Σε πιο ρεαλιστικές καταστάσεις, όμως, οι εργασίες έχουν τεθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, απαιτώντας δυναμικό προγραμματισμό και οι χρόνοι εγκατάστασης είναι εξαρτημένες ακολουθίες.

Για $m > 2$, το πρόβλημα είναι δύσκολο (**NP-hard**) και ως εκ τούτου οι ευρετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την εύρεση καλών λύσεων. Τρεις τύποι ευρετικών αλγορίθμων, όπως είναι οι αλγόριθμοι μοναδικού περάσματος (**single-pass**), οι εποικοδομητικοί και οι βελτιωμένοι χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος συνεχούς ροής και άλλα προβλήματα προγραμματισμού. Ένα παράδειγμα ενός αλγόριθμου μοναδικού περάσματος (**single-pass**) ευρετικού για το πρόβλημα συνεχούς ροής είναι ο ευρετικός αλγόριθμος Palmer (Palmer, 1965), στον οποίο, όσο αναφορά τις προγραμματισμένες δουλειές, η πιο δημοφιλής είναι η μη φθίνουσα σειρά των δεικτών των εργασιών των κατασκευαστικών ευρετικών, καθώς δημιουργεί καλύτερες λύσεις από τους ευρετικούς αλγόριθμους μοναδικού περάσματος (**single-pass**), παρόλο που υπάρχει μεγάλος αριθμός επιπλέον υπολογιστών. Παραδείγματα των δύο από τους πιο δημοφιλείς κατασκευαστικούς ευρετικούς αλγόριθμους είναι οι CDS (Campbell και άλλοι 1970) και NEH (Nawaz και άλλοι, 1983). Στους κατασκευαστικούς ευρετικούς οι ακολουθίες είναι κατασκευασμένες, έτσι ώστε να έχουν μία λειτουργία τη φορά.

Οι ευρετικοί αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης είναι επαναληπτικές προσεγγίσεις, όπως η αναζήτηση tabu, η προσομοιωμένη απόπτηση και οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA). Αυτές οι προσεγγίσεις είναι ουσιαστικά ντετερμινιστικές ή μη-ντετερμινιστικές τοπικές τεχνικές αναζήτησης, στις οποίες μια τοπική γειτονιά έχει διερευνηθεί στο χώρο αναζήτησης. Στην ντετερμινιστική αναζήτηση, χρησιμοποιείται κάποιο είδος προσέγγισης του λόφου-αναρρίχησης (hill-climbing) ή μια ντετερμινιστική κίνηση, όπως το εξαντλητικό ζεύγος ανταλλαγής (pair-wise exchange). Σε μη

ντετερμινιστική τοπική αναζήτηση η εξερεύνηση είναι τυχαία στη φύση. Για παράδειγμα, στο πρόβλημα GAs, η αναπαραγωγή χειρισμού είναι κάπως τυχαία. Οι Leon και Ramamoorthy (1997) πρότειναν μια μη-ντετερμινιστική προσέγγιση τοπικής αναζήτησης για το πρόβλημα της ευέλικτης συνεχούς ροής (**flexible flow-line problem**). Στο σημείο αυτό, τα αρχικά δεδομένα προσεγγίζονται τυχαία χρησιμοποιώντας ένα διάνυμα διαταραχής και εφαρμόζεται ο ίδιος ευρετικός. Στη συνέχεια, τα αρχικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συνάρτησης αντικειμενικής αξίας της ακολουθίας. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι στο πρόβλημα μπορούν να ενσωματωθούν ειδικές γνώσεις για την αναζήτηση μέσω της χρήσης ενός ευρετικού αλγόριθμου. Ο Taillard (1990) ανέπτυξε την τεχνική αναζήτησης tabu για το πρόβλημα συνεχούς ροής. Οι Ponnambalanet και άλλοι (2003) χρησιμοποίησαν γενετικούς αλγόριθμους, οι Osman και Potts (1989) χρησιμοποίησαν την προσομοιωμένη απόπτωση και οι Ying και Liao (2004) χρησιμοποίησαν τη βελτιστοποίηση της αποικίας μυρμηγκιών. Εκτός από αυτούς τους τέσσερις τύπους των ευρετικών βελτίωσης, οι οποίες παράγουν προσεγγιστικές λύσεις, υπάρχει η μέθοδος της διακλάδωσης και της οριοθέτησης (**branch-and-bound**) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει τις βέλτιστες λύσεις. Λόγω της εκθετικής υπολογιστικής πολυπλοκότητας των αλγόριθμων αυτών, όμως, δεν μπορούν να εφαρμοστούν και χρησιμοποιούνται μόνο σε προβλήματα με μικρό πληθυσμό.

Οι Goldengorinet και άλλοι (2003) πρότειναν και χρησιμοποίησαν την προσέγγιση της διατάραξης δεδομένων (data-perturbation approach). Ονόμασαν την προσέγγισή τους διόρθωση δεδομένων (data-correction approach) και χρησιμοποίησαν το πρόβλημα χωροθέτησης βιομηχανίας (**plant-location problem**). Ούτε οι Goldengorinet και άλλοι, ούτε οι Leon και Ramamoorthy θεώρησαν ότι είναι απαραίτητη οποιαδήποτε μάθηση της προσέγγισής αυτής. Η χρήση ενός ευρετικού μας δίνει ένα καλό σημείο εκκίνησης σε μια καλή γειτονιά στο χώρο αναζήτησης. Όσο καλύτερος είναι ο ευρετικός αλγόριθμος, τόσο καλύτερη είναι η αρχική γειτονιά αναζήτησης. Είναι δύσκολο να προβλέψουμε εάν μία συγκεκριμένη στρατηγική τροποποίησης βάρους θα μπορούσε να λειτουργήσει καλύτερα με ένα συγκεκριμένο ευρετικό, έτσι ώστε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια στρατηγική σε όλους τους ευρετικούς. Θα προκαλέσουμε μία διαταραχή από τις αλλαγές βάρους με την ελπίδα για μια καλύτερη λύση, με τον ίδιο τρόπο όπως τα νευρωνικά δίκτυα διαταράσσουν τα δεδομένα με τη χρήση σταθμισμένων μέσων. Εάν ένας ευρετικός αλγόριθμος μοναδικού περάσματος (**single-pass**), Α, αποδίδει καλύτερα από ό, τι ένας άλλος ευρετικός αλγόριθμος μοναδικού περάσματος (**single-pass**), Β, τότε ο Α αλγόριθμος τείνει να έχει καλύτερες επιδόσεις από το Β σε συνδυασμό με προσέγγιση ALA (**adaptive-learning approach**). Οι καλύτεροι ευρετικοί ξεκίνησαν την αναζήτηση σε μια καλύτερη γειτονιά στο χώρο αναζήτησης, επιτρέποντας στην προσέγγιση ALA το ενδεχόμενο περισσότερης βελτίωσης.

Η βιβλιογραφία είναι γεμάτη διαδικασίες προγραμματισμού με λύσεις για το γενικό πρόβλημα της χρονοδρομολόγησης της συνεχούς ροής και την ανάπτυξη

προγραμμαμάτων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου **makespan**. Λόγω της δύσκολης (**NP-hard**) φύσης του προβλήματος (Garey και άλλοι, 1976), οι περισσότερες διαδικασίες λύσης είναι ευρετικές προσεγγίσεις, έτσι ώστε να βρεθούν σχεδόν βέλτιστες ακολουθίες σε λογικό χρόνο.

Ο Baker (1974) έκανε μια εξαιρετική αναφορά για όλους τους τύπους ευρετικών προγραμματισμών και σεμιναρίων, συμπεριλαμβανομένου και του προβλήματος συνεχούς ροής. Ο Johnson (1954) πρώτος παρουσίασε έναν αλγόριθμο που απέδωσε τη βέλτιστη αλληλουχία για την n-εργασία, στο πρόβλημα των δύο μηχανών. Οι Gupta και Darrow (1986) συζήτησαν θέματα βελτιστοποίησης για προβλήματα που αφορούσαν την αλληλουχία δύο μηχανών στην περίπτωση όπου η ακολουθία εξαρτάται από το χρόνο εγκατάστασης. Ο Lomnicki (1965) πρότεινε τη μέθοδο της διακλάδωσης και της οριοθέτησης (**branch-and-bound**) για να βρεθεί η βέλτιστη μετάθεση των εργασιών. Η μέθοδος branch-and-bound μπορεί να βρει τη βέλτιστη λύση, αλλά με πολύ υψηλό υπολογιστικό κόστος, και ως εκ τούτου δεν μπορεί να επιχειρήσει να λύσει πολύ μεγάλα προβλήματα.

Ο Palmer (1965) πρότεινε μια προσέγγιση αλληλουχίας χρησιμοποιώντας ένα μέτρο που ονομάζεται δείκτης κλίσης. Ο Gupta (1971) παρουσίασε μια εναλλακτική προσέγγιση για τον υπολογισμό του δείκτη κλίσης. Ο Gupta (1979) επίσης αναπτύξε ένα λεξικογραφικό ευρετικό για το πρόβλημα συνεχούς ροής (**flow-shop problem**). Οι Campbell και άλλοι (1970), πρότειναν τους ευρετικούς αλγόριθμους CDS, οι οποίοι έδωσαν πολύ καλά αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος NEH (Nawaz και άλλοι, 1983) είναι πιθανόν η πιο γνωστή κατασκευαστική μέθοδος που χρησιμοποιείται σε προβλήματα συνεχούς ροής (**permutational flow-shop problems**). Στον αλγόριθμο NEH, η βασική ιδέα είναι να προγραμματίσετε πρώτα με τον βέλτιστο τρόπο τις δύο μεγαλύτερες εργασίες επεξεργασίας χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Johnson. Μετά, τοποθετήστε τις υπόλοιπες εργασίες, κατά φθίνουσα σειρά σύμφωνα με τον συνολικό χρόνο επεξεργασίας, μία προς μία, σε μία από τις θέσεις μεταξύ των ήδη προγραμματισμένων εργασιών, έτσι ώστε το συνολικό κριτήριο **makespan** να ελαχιστοποιείται σε κάθε βήμα. Οι Rajendran και Chaudhuri (1993) τροποποίησαν περαιτέρω τον αλγόριθμο NEH με την εισαγωγή της μέτρησης του σταθμισμένου μέσου για την επιλογή των εργασιών. Ο Taillard (1990) μελέτησε τις μεθόδους εποικοδομητικών αλγορίθμων και διαπίστωσε ότι οι εκτελέσεις του NEH αλγόριθμου είναι ανώτερες μεταξύ άλλων ευρετικών, που έχουν δοκιμαστεί. Οι Framinan και άλλοι (2003) βρήκαν επίσης λύσεις χρησιμοποιώντας τον NEH αλγόριθμο και την εκδοχή του.

Αρκετές ευρετικές μέθοδοι τοπικής αναζήτησης, όπως η αναζήτηση tabu, ο γενετικός αλγόριθμος, η προσομοιωμένη απόπτηση, η προσέγγιση της αποικίας μυρμηγκιών έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος συνεχούς ροής. Λόγω του διάσημου θεωρήματος για την αναζήτηση "Όχι Δωρεάν Γεύμα" ("No Free Lunch") (NFL) (Wolpert και Macready, 1995), η δομή του χώρου λύσης είναι πολύ κρίσιμη για την επιλογή μιας καλής μεθόδου για τη μελέτη των προβλημάτων συνεχούς ροής

(**flow-shop problems**). Για τυχαία προβλήματα, ο χώρος λύσης για προβλήματα συνεχούς ροής (**permutational flow-shop problems**) έχει μια δομή "μεγάλης" κοιλάδας (Reeves και Yamada, 1998). Σύμφωνα με το θεώρημα NFL, η ποιότητα λύσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη τεχνική εφαρμογή. Μια εφαρμογή τεχνικής που λύνει ένα συγκεκριμένο τύπο συνιστώσεων του προβλήματος δεν χρειάζεται να αποδίδει εξίσου καλά και σε άλλους τύπους συνιστώσεων του προβλήματος.

Παρά το γεγονός ότι η προσομοιωμένη απόκτηση (Ogbu και Smith, 1990, Osman και Potts, 1989) και οι προσεγγίσεις της αποικίας μυρμηγκιών (Ying και Liao, 2004) έχουν εφαρμοστεί, η αναζήτηση tabu (Smutnicki και Nowicki, 1996, Daya και Al-Fawzan, 1998, Grabowski και Wodecki, 2002), και ο γενετικός αλγόριθμος (Chen και άλλοι, 1995, Reeves και Yamada, 1998) είναι τεχνικές, που είναι οι πιο δημοφιλείς, λόγω των καλών αποτελεσμάτων τους. Επιπλέον, από την ανάπτυξη της μεθόδου αναζήτησης του προβλήματος-χώρου, οι Leon και Ramamoorthy (1997) ανέπτυξαν κατώτερα όρια για το πρόβλημα συνεχούς ροής (**flow-shop problem**). Αυτά τα κατώτερα όρια βελτιώθηκαν αργότερα από τους Kurz και Askin (2001) [47].

4.5 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο πρόβλημα συνεχούς ροής μη αναμονής με δύο μηχανές

Υπάρχουν n εργασίες που πρέπει να μπου σε παρτίδες και να προγραμματιστούν για επεξεργασία στις δύο μηχανές. Κάθε μηχανή είναι μία μηχανή παρτίδων που μπορεί να επεξεργαστεί διάφορες εργασίες στην παρτίδα. Κάθε εργασία πρέπει να γίνεται και στις δύο μηχανές 1 και 2 και να μπαίνουν με τη σειρά. Ο χρόνος επεξεργασίας για την j εργασία στις μηχανές 1 και 2 είναι τουλάχιστον p_j και q_j μονάδες χρόνου αντίστοιχα. Όλες οι εργασίες, όταν βρίσκονται στην ίδια παρτίδα, αρχίζουν και τελειώνουν την επεξεργασία τους στην ίδια μηχανή παρτίδων την ίδια ώρα (διαθεσιμότητα παρτίδας).

Η πρώτη μηχανή παρτίδων (1) ονομάζεται μηχανή μέγιστης παρτίδας ή παράλληλης παρτίδας (**p-batch**) και έχει την ικανότητα να χειρίζεται πολλές εργασίες ταυτόχρονα. Ο χρόνος επεξεργασίας παρτίδας σε αυτή τη μηχανή είναι ίσος με το μέγιστο χρόνο επεξεργασίας των εργασιών για τη συγκεκριμένη παρτίδα. Αυτές οι ικανότητες των παρτίδων οριοθετούνται από μερικούς ακέραιους αριθμούς b ($b < n$). Η δεύτερη μηχανή ονομάζεται μηχανή αθροιστικής παρτίδας ή σειριακή παρτίδα (**s-batch**), και χειρίζεται διαδοχικά τις εργασίες. Ο χρόνος επεξεργασίας της παρτίδας σε αυτή τη μηχανή είναι ίση με το άθροισμα του χρόνου διεκπεραίωσης των εργασιών για τη συγκεκριμένη παρτίδα. Τέτοιες μηχανές απαιτούν χρόνο προετοιμασίας πριν από την εκτέλεση της παρτίδας.

Υπάρχουν δύο παραλλαγές του χρόνου εγκατάστασης. Στην πρώτη παραλλαγή, η οποία ονομάζεται προληπτικό ή ανεξάρτητο μοντέλο (**anticipatory or detached model**), η εγκατάσταση μπορεί να γίνει πριν από την σχετιζόμενη παρτίδα, η οποία είναι διαθέσιμη στη μηχανή. Ενώ στην άλλη παραλλαγή, η οποία ονομάζεται μη προληπτικό ή συνιμμένο μοντέλο (**non-anticipatory or attached model**), ο χρόνος

εγκατάστασης μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο όταν όλες οι εργασίες, που έχουν ανατεθεί στην αντίστοιχη παρτίδα, είναι διαθέσιμες στη μηχανή. Οι παρτίδες υποβάλλονται σε επεξεργασία χωρίς αναμονή, έτσι ώστε ο χρόνος ολοκλήρωσης της παρτίδας στη μηχανή 1 να συμπέσει με την ώρα έναρξης στη μηχανή 2.

Ένα πρόγραμμα χαρακτηρίζεται από το διαχωρισμό των εργασιών σε παρτίδες για κάθε μηχανή και στη συνέχεια σε προσδιορισμό της αλληλουχίας των παρτίδων. Λόγω μη αναμενόμενων περιορισμών, τα χωρίσματα και οι ακολουθίες παρτίδων είναι ίδιες και για τις δύο μηχανές. Ο στόχος είναι, λοιπόν, να βρεθεί ένα πρόγραμμα που να ελαχιστοποιεί το χρόνο ολοκλήρωσης της παρτίδας. Χρησιμοποιώντας το γενικό συμβολισμό για τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν από τον προγραμματισμό του Graham και των άλλων και το συμβολισμό των παρτίδων μηχανών, γράφουμε **F2|p-batch(1), s-batch(2), b, no-wait |Cmax** για να αναφερθούμε σε αυτό το πρόβλημα.

Οι Potts και Van Wassenhove, οι Webster και Baker, και οι Potts και Kovalyov δημοσίευσαν μια εκτενή έρευνα του προβλήματος προγραμματισμού της παρτίδας. Οι Potts και άλλοι μελέτησαν το πρόβλημα παραγωγής συνεχούς ροής (**flowshop problem**) με δύο παράλληλες μηχανές παρτίδας, αλλά χωρίς κανένα περιορισμό αναμονής. Δημιούργησαν ένα πολυωνυμικό αλγόριθμο για το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του χρόνου ολοκλήρωσης της παρτίδας, όταν και οι δύο παράλληλες μηχανές μπορούν να επεξεργαστούν ένα απέραντο αριθμό εργασιών στην ίδια παρτίδα. Επίσης, απέδειξαν ότι το πρόβλημα αυτό είναι δύσκολο (**NP-hard**) όταν τουλάχιστον μία μηχανή μπορεί να επεξεργαστεί b εργασίες στην ίδια παρτίδα με $b < n$. Οι Oulamara και άλλοι μελέτησαν το πρόβλημα συνεχούς ροής μη αναμονής (**no-wait flowshop problem**) με δύο παράλληλες μηχανές και πρότειναν έναν πολυωνυμικό αλγόριθμο για το παραπάνω πρόβλημα, ο οποίος μπορεί να επεκταθεί και σε περιπτώσεις m παράλληλων μηχανών. Οι Lin and Cheng μελέτησαν προβλήματα συνεχούς ροής (**flowshops**) με δύο σειριακές μηχανές και με κανένα περιορισμό αναμονής. Έδειξαν ότι το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του χρόνου ολοκλήρωσης είναι δύσκολο (**NP-hard**) και εντόπισαν ορισμένες περιπτώσεις που μπορεί να λυθούν πολυωνυμικά. Οι Hall και άλλοι μελέτησαν τα προβλήματα κατάτμησης σε ένα σύνολο πανομοιότυπων εργασιών μέσα στις παρτίδες, κατά τη διάρκεια της ροής χωρίς περιορισμό αναμονής, με αύξοντα αριθμό μηχανών παρτίδων. Ανέπτυξαν ένα αλγόριθμο δυναμικού προγραμματισμού για το ενιαίο πρόβλημα παραγωγής και διατύπωσαν το πρόβλημα πολλαπλής παραγωγής, όπως για παράδειγμα το γενικευμένο πρόβλημα του περιπλανώμενου πωλητή. Οι Oulamara και Finke μελέτησαν το πρόβλημα συνεχούς ροής με δύο μηχανές (**p-batch και s-batch**), αλλά χωρίς κανένα περιορισμό αναμονής. Απέδειξαν ότι η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου **makespan** είναι πολυώνυμο για την περίπτωση κατά την οποία η ικανότητα της παρτίδας είναι απεριόριστη στις παράλληλες μηχανές. Για το λόγο αυτό, αποδεκνύεται ότι η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου **makespan** είναι δύσκολο (**NP-hard**) [48].

4.6 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο πρόβλημα συνεχούς ροής (permutation flowshop sequencing problem) (PFSP)

Η μετάθεση της αλληλουχίας του προβλήματος συνεχούς ροής (**permutation flowshop sequencing problem**) (PFSP) καθορίζει τη σειρά των επεξεργαζόμενων εργασιών στις μηχανές για την βελτιστοποίηση της απόδοσης ορισμένων μέτρων, όταν όλες οι εργασίες έχουν την ίδια ακολουθία στις μηχανές. Τα προβλήματα συνεχούς ροής έχουν τραβήξει την προσοχή από όταν ο Johnson πρώτος πρότεινε το πρόβλημα. Μεταξύ αυτών των πρακτικών μέτρων απόδοσης, η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου **makespan** και του συνολικού χρόνου ροής είναι γνωστό ότι οδηγούν στην ελαχιστοποίηση της συνολικής περιόδου παραγωγής, τη σταθερή χρησιμοποίηση των πόρων, την ταχεία εναλλαγή των εργασιών, καθώς και την ελαχιστοποίηση των εργασιών κατά την απογραφή της παραγωγικής διαδικασίας (WIP).

Όσο αναφορά την πολυπλοκότητα των προβλημάτων PFSP με αυτά τα δύο κριτήρια, ο Rinnooy Kan απέδειξε ότι η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου makespan είναι NP-πλήρες (**NP-complete**), και οι Garey και άλλοι απέδειξαν ότι η ελαχιστοποίηση του χρόνου ροής ήταν NP-πλήρες (**NP-complete**). Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την ανακάλυψη υψηλής ποιότητας λύσεων σε εύλογο χρονικό διάστημα από τεχνικές ευρετικής βελτιστοποίησης, οι οποίες έχουν ως στόχο την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης. Οι ευρετικοί αλγόριθμοι για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κριτηρίου makespan έχουν προταθεί από τους Palmer, Campbell και άλλους, Dannenbring, Nawaz και άλλους, Taillard, Framinan και άλλους και τους Framinan και Leisten. Για να κατορθώσουν μια καλύτερη ποιότητα λύσης, έχουν παρουσιαστεί μοντέρνοι μεθευρετικοί αλγόριθμοι για το πρόβλημα PFSP με ελαχιστοποίηση του κριτηρίου makespan. Ορισμένα παραδείγματα είναι η προσομοιωμένη ανόπτηση, η αναζήτηση tabu, οι γενετικοί αλγόριθμοι, η βελτιστοποίηση της αποικίας μυρμηγκιών και η επανάληψη τοπικής αναζήτησης. Ο Taillard έκανε 120 αναφορές χρησιμοποιώντας τους μοντέρνους ευρετικούς αλγόριθμους για να ελέγξει την απόδοση τους. Πιο πρόσφατα, οι Watson και άλλοι παρουσίασαν μια νέα αναφορά που περιλαμβάνει 14.000 περιπτώσεις τυχαίου (**random-type**) και οργανωμένου τύπου (**structured-type**).

Όσον αφορά την ελαχιστοποίηση του χρόνου ροής, πολλές μέθοδοι ακριβής λύσης προτείνονται από τους Ignall και Schrage, Bansal και Stafford. Ωστόσο, αυτοί οι μέθοδοι είναι πρακτικοί μόνο για μέτρια ή μικρά προβλήματα. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος, η ανάπτυξη αποτελεσματικών ευρετικών αλγορίθμων αποτέλεσε το επίκεντρο του ενδιαφέροντος για τους ερευνητές. Οι ευρετικοί αλγόριθμοι παρουσιάζονται από τους Gupta, Gelders και Sambandam, Miyazaki και άλλους, Miyazaki και Nishiyama, Ho και Chang, Rajendran και Chaudhuri, Rajendran, Ho, Rajendran και Ziegler, Wang και άλλοι, Woo και Yim, Yamada και Reeves, Liu και Reeves, Allahverdi και Aldowaisan, και Framinan και άλλους.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (**Particle swarm optimization**) (PSO) είναι μία από τις τελευταίες εξελικτικές μεθόδους βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από τη φύση. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων περιλαμβάνει την εξελικτική στρατηγική (ES), τον εξελικτικό προγραμματισμό (EP), το γενετικό αλγορίθμο (GA), και το γενετικό προγραμματισμό (GP). Το PSO βασίζεται στη μεταφορά της κοινωνικής αλληλεπίδρασης και επικοινωνίας, όπως είναι η συσσώρευση των πουλιών και η εκπαίδευση των ψαριών. Το PSO είναι σαφώς διαφορετικό από τις άλλες εξελικτικές μεθόδους με τέτοιο τρόπο ώστε να μη χρησιμοποιεί τη λειτουργία φιλτραρίσματος, όπως τη διασταύρωση ή τη μετάλλαξη. Τα μέλη του αλγόριθμου PSO στον πληθυσμό διατηρούνται μέσω της διαδικασίας αναζήτησης, ώστε οι πληροφορίες να είναι κοινωνικά κοινές μεταξύ των ατόμων και έτσι να κατευθύνει την έρευνα προς την κατεύθυνση της καλύτερης θέσης στο χώρο αναζήτησης. Σε έναν αλγόριθμο PSO, κάθε μέλος καλείται σωματίδιο (**particle**) και κάθε σωματίδιο κινείται γύρω στο πολυδιάστατο χώρο αναζήτησης με μια συγκεκριμένη ταχύτητα. Δύο παραλλαγές του αλγορίθμου PSO αναπτύχθηκαν και είναι οι αλγόριθμοι PSO σε μια τοπική γειτονιά, και οι αλγόριθμοι PSO σε μια παγκόσμια γειτονιά. Σύμφωνα με τη παγκόσμια γειτονιά, κάθε σωματίδιο κινείται προς την βέλτιστη προηγούμενη θέση του και προς το βέλτιστο σωματίδιο σε όλο το σμήνος, το οποίο ονομάζεται στη βιβλιογραφία **gbest** μοντέλο. Από την άλλη, στην τοπική παραλλαγή, η οποία ονομάζεται **lbest** μοντέλο, κάθε σωματίδιο κινείται προς την κατεύθυνση της βέλτιστης προηγούμενης θέσης του και προς το βέλτιστο σωματίδιο στην περιορισμένη γειτονιά του.

Από τότε που η μέθοδος PSO εισήχθη για πρώτη φορά για τη βελτιστοποίηση των διαφόρων συνεχών μη-γραμμικών συναρτήσεων (**continuous nonlinear functions**) από τους Kennedy και Eberhart, έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως είναι η ενέργεια και η τάση ελέγχου, τα νευρωνικά δίκτυα κατάρτισης, το σύστημα μάζας-ελατηρίου, η ανάθεση εργασιών (**task assignment**), το πρόβλημα επιλογής προμήθευσης και παραγγελίας, τα προβλήματα μετάθεσης συνεχούς ροϊκής αλληλουχίας (**permutation flowshop sequencing problems**), ορισμένα προβλήματα μεγέθους, τα προβλήματα συνολικής σταθμισμένης βραδύτητας με μία μηχανή και η αυτοματοποιημένη διάτρηση (**automated drilling**). Οι εφαρμογές των αλγορίθμων PSO σε συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης είναι ακόμη περιορισμένη, αλλά τα πλεονεκτήματα ενός αλγορίθμου PSO είναι πολλά. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι: η απλή δομή, ότι είναι άμεσα προσβάσιμος για πρακτικές εφαρμογές, η ευκολία της υλοποίησης, η ταχύτητα στη λήψη των λύσεων και η ευρρωστία που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, το μεγαλύτερο εμπόδιο για την επιτυχία της εφαρμογής ενός αλγορίθμου PSO σε προβλήματα συνδυαστικής οφείλεται στο διαρκή χαρακτήρα τους. Για να διορθωθεί αυτό το μειονέκτημα, η μικρότερη τιμή της θέσης (SPV) μετατρέπεται από ένα τυχαίο κλειδί εκπροσώπησης (**random key representation**), όπως παρουσιάζεται στον αλγόριθμο PSO, έτσι ώστε να γίνει η μετατροπή των συνεχών τιμών σε διακριτές. Αυτό έχει εφαρμοστεί αποτελεσματικά στο πρόβλημα συνολικής σταθμισμένης βραδύτητας με μία μηχανή (**single machine total weighted tardiness**) (SMTWT) και στο πρόβλημα μετάθεσης

συνεχούς ροϊκής αλληλουχίας (**permutation flowshop sequencing problem**) (PFSP) [49].

4.7 Ελαχιστοποίηση κριτηρίου makespan στο πρόβλημα προγραμματισμού συνεχούς ροής (**permutation flowshop scheduling problem**)

Το πρόβλημα προγραμματισμού συνεχούς ροής (**permutation flowshop scheduling problem**) είναι ένα πρόβλημα προγραμματισμού n εργασιών σε m διαδοχικές μηχανές. Κάθε μηχανή μπορεί να επεξεργαστεί το πολύ μία εργασία σε ένα συγκεκριμένο χρόνο, και η εργασία που ξεκίνησε πρέπει να προχωρήσει στην ολοκλήρωση μια φορά. Οι n εργασίες είναι ανεξάρτητες, ταυτόχρονα διαθέσιμες σε μηδενικό χρόνο, και οι αλληλουχίες των εργασιών στις μηχανές είναι ίδιες. Επιπλέον, κάθε δουλειά έχει ένα γνωστό πεπερασμένο χρόνο επεξεργασίας για κάθε μηχανή, καθώς και οι χρόνοι επεξεργασίας είναι ανεξάρτητοι από τη σειρά με την οποία πραγματοποιούνται οι εργασίες. Επίσης, όλες οι εργασίες θεωρούνται ίσης προτεραιότητας, και είναι επιτρεπτή η διαδικασία απογραφής. Ο στόχος είναι να βρεθεί μια ακολουθία από n εργασίες, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κριτήριο **makespan**.

Ακριβείς τεχνικές λύσεων αναπτύχθηκαν με στόχο τη βελτιστοποίηση μόνο ορισμένων σαφώς καθορισμένων κριτηρίων για προβλήματα που αφορούν ένα περιορισμένο αριθμό εργασιών και μηχανών. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί προσεγγιστικές μέθοδοι για την επίλυση των μεγάλων προβλημάτων με περιορισμένες υπολογιστικές προσπάθειες, όμως δεν εγγυώνται τη βελτιστοποίηση.

Πληθώρα ερευνητικών εργασιών έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές παραλλαγές του προβλήματος προγραμματισμού συνεχούς ροής (**flowshop**). Οι προσπάθειες που αφορούν την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου **makespan** έχουν αναφερθεί σε υποθέσεις που αφορούν ένα μόνο μηχάνημα και ντετερμινιστικούς χρόνους επεξεργασίας, καθώς και σε περισσότερα πολύπλοκα προβλήματα με την ενσωμάτωση περιπτώσεων με πολλαπλές μηχανές, μη μηδενικούς χρόνους, και τυχαίους χρόνους επεξεργασίας.

Οι Ho και Chang ανέπτυξαν ένα βελτιωμένο ευρετικό για την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού συνεχούς ροής (**flowshop**). Η μέθοδος ελαχιστοποιεί τα κενά μεταξύ διαδοχικών πράξεων σε λύσεις που παράγονται από άλλους ευρετικούς. Με άλλα λόγια, αυτό ελαχιστοποιεί το χρόνο αναμονής στη μηχανή και το χρόνο αναμονής της δουλειάς που προκύπτει από μία αρχική λύση. Ο παραγόμενος ευρετικός αλγόριθμος συγκρίθηκε με τους άλλους γνωστούς ευρετικούς, και έδειξε καλύτερη απόδοση σε σχέση με το κριτήριο **makespan**, ενώ η αύξηση του χρόνου της CPU ήταν μέτρια.

Οι Osman και Potts πρότειναν τον ευρετικό της προσομοιωμένης απόκτησης για μία γειτονιά και την τυχαία αλλαγή αναζήτησης για την απόκτηση προσέγγισης λύσεων για τη μετάθεση του προβλήματος προγραμματισμού συνεχούς ροής (**permutation flowshop scheduling problem**). Εκτεταμένες δοκιμές με προβλήματα

διαφόρων μεγεθών έδειξαν ότι η προσομοιωμένη ανόπτηση μπορεί να συγκριθεί ευνοϊκά σε σχέση με τους κατασκευαστικούς ευρετικούς και με τις μεθόδους καθόδου.

Οι Murata και άλλοι εφάρμοσαν ένα γενετικό αλγόριθμο στο πρόβλημα προγραμματισμού συνεχούς ροής (**flowshop scheduling problem**) με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου **makespan**. Μέσω προσομοίωσης σε υπολογιστή, έδειξαν ότι η υβριδοποίηση των γενετικών αλγορίθμων με άλλους αλγόριθμους αναζήτησης (τοπική αναζήτηση, αναζήτηση taboo και προσομοιωμένη ανόπτηση) θα δημιουργούσαν λύσεις υψηλής απόδοσης.

Οι Finke και Jiang θεώρησαν ένα πρόβλημα συνεχούς ροής (**flowshop**) με εξαρτούμενους χρόνους επεξεργασίας. Όρισαν ένα αντίστροφο πρόβλημα για το οποίο πρότειναν μια σειρά από ευρετικούς αλγόριθμους. Ο Szwarc και ο Cao Bedworth, και άλλοι θεώρησαν το πρόβλημα συνεχούς ροής (**flowshop**) με μεταβλητές χρονικές καθυστερήσεις. Οι Ramazani και Younis ανέπτυξαν μια διαδικασία μετάθεσης για την επίλυση των επαναλαμβανόμενων προβλημάτων συνεχούς ροής (**flowshop**). Το αρχικό πρόβλημα μετατρέπεται σε ένα ισοδύναμο υποκατάστατο ώστε να μοιάζει με το πρόβλημα συνεχούς ροής (**flowshop**) που έχει λυθεί από τους γνωστούς υπάρχοντες ευρετικούς αλγόριθμους. Ο Guinet και ο Solomon μελέτησαν το υβριδικό πρόβλημα προγραμματισμού συνεχούς ροής (**hybrid flowshop scheduling problem**). Ανέπτυξαν μια σειρά αλγορίθμων για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Η αξιολόγηση της ποιότητας αυτών των ευρετικών ανέφερε ότι ένας ευρετικός, ο οποίος στηρίχτηκε στις μεθόδους Nawaz, Ensore και Ham (NEH), ξεπέρασε τις άλλες προσεγγίσεις.

Πέντε από τους γνωστούς ευρετικούς αλγόριθμους αξιολογήθηκαν για την απόδοσή τους από τον Setiাপutra. Με βάση τη μέθοδο πολλαπλής ταξινόμησης Keul-Newman (**Keul-Newman multipleranking method**) και την εντατική χρήση του αλγορίθμου Johnson, οι ευρετικοί Campbell, Dudek και Smith (CDS) παράγαγαν εξαιρετικά αποτελέσματα. Σε μια άλλη μελέτη από τον Park συγκρίθηκαν δεκαέξι αλγόριθμοι, και η μέθοδος NEH βρέθηκε να είναι ο πιο προκατειλημμένος και ο πιο αποτελεσματικός ευρετικός σε σχέση με το κριτήριο **makespan**, ενώ ο επόμενος ήταν ο ευρετικός αλγόριθμος CDS [50].

Κεφάλαιο 5. Περιγραφή του προβλήματος που θα επιλυθεί

Το πρόβλημα προγραμματισμού μετάθεσης συνεχούς ροής (**permutation flowshop scheduling problem**) (PFSP), όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι ένα από τα πιο γνωστά προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Στο πρόβλημα αυτό, ο στόχος είναι η μετάθεση των εργασιών, οι οποίες θα πρέπει να περάσουν από όλες τις μηχανές, και ελαχιστοποιούν το κριτήριο makespan, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί.

Το πρόβλημα PFSP αποτελείται από ένα πεπερασμένο σύνολο J από n εργασίες $\{J_i\}_{i=1}^n$ που υφίσταται επεξεργασία σε ένα πεπερασμένο σύνολο M από m μηχανές $\{M_k\}_{k=1}^m$. Κάθε εργασία J_i αποτελείται από m εργασίες ($O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im}$) και όλες οι εργασίες J_i πρέπει να υφίστανται επεξεργασία σε κάθε μηχανή με την ίδια ακολουθία, που δίνεται από την εισαγωγή των εργασιών στις μηχανές. Η O_{ik} είναι η k -οστή λειτουργία της εργασίας J_i , η οποία πρέπει να υποβάλλεται σε επεξεργασία στη μηχανή M_k για συνεχή και σταθερό χρόνο επεξεργασίας περιόδου p_{ik} , ενώ καμία λειτουργία δεν μπορεί να είναι αποφασισμένη από πριν. Στο γενικό πρόβλημα PFSP, κάθε μηχανή μπορεί να επεξεργάζεται μόνο μία εργασία και κάθε εργασία μπορεί να γίνεται μόνο από μία μηχανή τη φορά (περιορισμοί χωρητικότητας). Σύμφωνα με τον αριθμό των εργασιών (n) και των μηχανών (m), η διάσταση του προβλήματος ροής ορίζεται ως $n \times m$ και ο συνολικός αριθμός των λειτουργιών είναι $N = n \times m$. Στο πρόβλημα που λύνεται παρακάτω, διαθέτουμε είκοσι εργασίες και πέντε μηχανές. Επομένως στη μελέτη μας, η διάσταση του προβλήματος ροής ορίζεται ως 20×5 και ο συνολικός αριθμός των λειτουργιών είναι $N = 20 \times 5$.

Έστω $C(k, J_i)$ ο χρόνος ολοκλήρωσης της εργασίας J_i στη μηχανή k και έστω $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ μία μετάθεση των εργασιών. Ο χρόνος ολοκλήρωσης για το πρόβλημα ροής n -εργασιών και m -μηχανών υπολογίζεται ως εξής:

$$C(1, \pi_1) = p_{1,\pi_1}, \quad (1)$$

$$C(1, \pi_j) = C(1, \pi_{j-1}) + p_{1,\pi_j}, \quad j = 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$C(k, \pi_1) = C(k-1, \pi_1) + p_{k,\pi_1}, \quad k = 2, \dots, m, \quad (3)$$

$$C(k, \pi_j) = \max\{C(k, \pi_{j-1}), C(k-1, \pi_j) + p_{k,\pi_j}\}, \quad j = 2, \dots, n, k = 2, \dots, m. \quad (4)$$

Το κριτήριο makespan δίνεται από την παρακάτω συνάρτηση

$$C_{\max}(\pi) = C(m, \pi_n). \quad (5)$$

Έτσι, στο πρόβλημα PFSP με το κριτήριο makespan ο σκοπός είναι να βρεθεί μια μετάθεση π^* από το σύνολο όλων των μεταθέσεων Π , έτσι ώστε:

$$C_{\max}(\pi^*) \leq C(m, \pi_n), \quad \forall \pi \in \Pi. \quad (6)$$

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για το πρόβλημα που λύσαμε, όπου n είναι ο αριθμός των εργασιών, δηλαδή 20 και m ο αριθμός των μηχανών, δηλαδή 5.

5.1 Επίλυση του προβλήματος με εφαρμογή του αλγορίθμου τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος

Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab και παρακάτω υπάρχει μια σύντομη περιγραφή για τον τρόπο λειτουργίας του. Αρχικά δημιουργείται ένας τυχαίος πληθυσμός P, κάθε μέλος του οποίου αποτελεί και μια λύση για το πρόβλημα που επιλύουμε.

Οι κλώνοι παράγονται σε ένα ποσοστό ανάλογο με τον πληθυσμό P, δηλαδή τα ισχυρότερα μέλη παράγουν και τους περισσότερους κλώνους. Κάθε κλώνος υπόκειται σε ένα ποσοστό μετάλλαξης, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Από τους κλώνους που παράγονται επιλέγονται αυτοί που παρουσιάζουν το ελάχιστο κόστος, ενώ αφαιρούνται από τον πληθυσμό οι κλώνοι με την μεγαλύτερο κόστος. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται ο πληθυσμός S. Στη συνέχεια, παράγεται ένας τυχαίος πληθυσμός R που παράγεται για να αντικαταστήσει ένα ποσοστό από τα χειρότερα μέλη του πληθυσμού P. Έτσι, δημιουργείται ένας καινούργιος πληθυσμός, στον οποίο τα χειρότερα μέλη του αρχικού πληθυσμού P αντικαταστάθηκαν τα καλύτερα μέλη των πληθυσμών S και R.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα προκαθορισμένο πλήθος επαναλήψεων. Τα επιμέρους βήματα του αλγορίθμου αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.

Βήμα 1^ο: Δημιουργία του αρχικού πληθυσμού (P). Ο αρχικός πληθυσμός επιλέγεται τυχαία, μιας και ο αλγόριθμος ρωτάει τον χρήστη στην αρχή για τον επιθυμητό πληθυσμό. Τα μέλη του τυχαίου πληθυσμού αποτελούν και τα αντισώματα. Τα αρχικά δεδομένα για τους χρόνους επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές, βρίσκονται στο αρχείο **tai20_5** και στο πρόβλημα μας συμβολίζουμε με πίνακα A. Στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του κάθε αντισώματος. Στο πρόβλημα που εξετάζουμε, η αντικειμενική συνάρτηση είναι είναι αυτή που μας δίνει το κριτήριο makespan, δηλαδή η συνάρτηση (5).

Βήμα 2^ο: Επιλογή των καλύτερων μελών, δημιουργία του πληθυσμού (F). Αφού δημιουργηθεί ο αρχικός πληθυσμός, γίνεται φθίνουσα ταξινόμηση με βάση το συνολικό χρόνο επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές και επιλέγονται τελικά οι καλύτερες n λύσεις.

Βήμα 3^ο: Δημιουργία των κλώνων. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως τα ισχυρότερα μέλη του πληθυσμού παράγουν του περισσότερους κλώνους. Τα μέλη ταξινομούνται με βάση το συνολικό χρόνο επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές και στη συνέχεια παράγουν κλώνους και μεταλλάσσονται με σκοπό να δημιουργηθεί ένας νέος πληθυσμός αντισωμάτων F_C. Ο τύπος που εφαρμόζεται για την εύρεση του πλήθους των κλώνων είναι ο παρακάτω:

$$F_C = \sum_{i=2}^N \beta * (i - 2), i=2,4,\dots,N \quad (7)$$

Στον παραπάνω τύπο, το β είναι μία παράμετρος πολλαπλασιασμού και $N=10$. Για παράδειγμα αν $\beta=1$ και $N=10$, τότε το καλύτερο άτομο του πληθυσμού, δηλαδή για $i=10$, θα παράγει 10 κλώνους, το δεύτερο καλύτερο 8 κ.τ.λ. Η παράμετρος β ορίστηκε να είναι ίση με 1 και το $N=10$.

Βήμα 4^ο: Μετάλλαξη των κλώνων. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας τελεστής υπερμετάλλαξης (hypermutation). Ο όρος υπερμετάλλαξη σημαίνει ότι, αντίθετα με τους γενετικούς αλγόριθμους, όπου η μετάλλαξη πραγματοποιείται σε ένα μικρό ποσοστό των ψηφίων που αποτελούν τη λύση του κάθε ατόμου του πληθυσμού, στην υπερμετάλλαξη ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των ψηφίων μεταλλάσσονται. Σε ορισμένες περιπτώσεις το ποσοστό αυτό φτάνει και πάνω από 80%. Επομένως, σε αυτόν τον τελεστή μετάλλαξης, τα ψηφία που θα μεταλλαχθούν επιλέγονται τυχαία. Αρχικά, επιλέγεται ένας αριθμός που καθορίζει τον τελεστή μετάλλαξης, ο οποίος συμβολίζεται Cr και ελέγχει την αναλογία των ψηφίων που θα μεταλλαχθούν, δηλαδή ελέγχει τη σειρά που θα μπουν οι εργασίες στις μηχανές. Η τιμή του Cr συγκρίνεται με την τιμή μίας γεννήτριας $rand_i(0,1)$. Επομένως, αν η τιμή της γεννήτριας τυχαίων αριθμών είναι μικρότερη ή ίση με το Cr , τότε το αντίστοιχο ψηφίο θα μεταλλαχθεί. Σε αντίθετη περίπτωση, το ψηφίο θα παραμείνει το ίδιο με το ψηφίο στο αρχικό αντίσωμα. Επομένως, η επιλογή του Cr είναι αρκετά σημαντική, μιας και αν η τιμή είναι πολύ κοντά ή ίση με το 1, τότε τα περισσότερα από τα ψηφία του κάθε κλώνου μεταλλάσσονται, ενώ αν η τιμή είναι κοντά στο 0 τότε σχεδόν κανένα ψηφίο δεν μεταλλάσσεται. Ο τρόπος με τον οποίο μεταλλάσσεται η σειρά των εργασιών στις μηχανές στο πρόβλημα που λύθηκε είναι η αντιμετάθεση μιας τυχαίας εργασίας σε μια σειρά, η οποία βρίσκεται σε ζυγή θέση στη σειρά αυτή, με την επόμενη εργασία στην ίδια σειρά.

Για παράδειγμα μία σειρά θα μπορούσε να μεταλλαχθεί με τον παρακάτω τρόπο με δεδομένο ότι η τιμή της γεννήτριας τυχαίων αριθμών στη δεύτερη θέση είναι μικρότερη από το Cr :

2 4 12 5 3 9 10
2 12 4 5 3 9 10

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στον κλασσικό αλγόριθμο επιλογής κλώνων, ο ρυθμός υπερμετάλλαξης είναι αντιστρόφως ανάλογος με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επιπλέον, σε μια παραλλαγή του βασικού αλγόριθμου προστέθηκε ότι οι κλώνοι που προέρχονται από το ίδιο αντίσωμα έχουν διαφορετικούς ρυθμούς υπερμετάλλαξης. Άρα, αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται έτσι ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διασπορά των λύσεων μέσα στον πληθυσμό των κλώνων.

Για να βρεθεί σε ποιο κλώνο θα εφαρμοστεί ο τελεστής υπερμετάλλαξης χρησιμοποιείται ένας αριθμός που καθορίζει τον τελεστή ωρίμανσης και συμβολίζεται με Mr . Η τιμή του Mr συγκρίνεται με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών $rand_i(0,1)$. Επομένως, αν η τιμή της γεννήτριας τυχαίων αριθμών είναι μικρότερη ή ίση με το Mr , τότε στον αντίστοιχο κλώνο θα εφαρμοστεί ο τελεστής υπερμετάλλαξης. Στο πρόβλημα που λύθηκε, το Mr είναι ίσο με 0.7.

Επομένως, στο βήμα αυτό προσπαθούμε να βρούμε μέσα από ένα πλήθος επαναλήψεων, των μισών σε αριθμό από τον αρχικό πληθυσμό P , τη βέλτιστη σειρά

των εργασιών σε κάθε μηχανή, σε κάθε άτομο, η οποία θα οδηγήσει τελικά στο συντομότερο χρόνο επεξεργασίας. Ο γενετικός αλγόριθμος δέχεται σαν είσοδο την κάθε σειρά του κάθε αντισώματος και προσπαθεί να προσεγγίσει την καλύτερη λύση. Τέλος, οι τιμές του Cr είναι από το 0.6 έως το 0.9, ανάλογα με το παράδειγμα που λύσαμε και θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενη παράγραφο.

Βήμα 5^ο: Επιλογή των καλύτερων κλώνων, δημιουργία πληθυσμού S. Αφού δημιουργηθεί ο πληθυσμός των κλώνων γίνεται φθίνουσα ταξινόμηση με βάση το χρόνο επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές όπως αυτό προκύπτει για κάθε μέλος του πληθυσμού και επιλέγονται τελικά τα καλύτερα n άτομα.

Βήμα 6^ο: Δημιουργία του πληθυσμού R. Δημιουργείται ένας τυχαίος πληθυσμός, ο οποίος χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει ένα ποσοστό από τα χειρότερα αντισώματα του αρχικού πληθυσμού (P). Στο πρόβλημα που λύσαμε, το ποσοστό αντικατάστασης των χειρότερων αντισωμάτων είναι το 10%.

Βήμα 7^ο: Αντικατάσταση των χειρότερων μελών του P. Τα μέλη των πληθυσμών S, R, P ταξινομούνται με βάση το χρόνο επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές. Στη συνέχεια, τα ισχυρότερα άτομα από τους πληθυσμούς S και R αντικαθιστούν τα χειρότερα μέλη, από την άποψη της σύγκλισης προς την βέλτιστη λύση, του πληθυσμού P.

Βήμα 8^ο: Εφαρμογή του αλγορίθμου τοπικής αναζήτησης. Μετά τη δημιουργία του παραπάνω τελικού πληθυσμού κάθε επανάληψη, εφαρμόζουμε στα μέλη του τον αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης 2-opt, έτσι ώστε να προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε την τρέχουσα λύση. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτίωση που προέρχεται από την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου είναι πολύ μικρή.

Βήμα 9^ο: Τερματισμός του αλγορίθμου. Τα παραπάνω βήματα του αλγορίθμου, εκτός του πρώτου της δημιουργίας δηλαδή του αρχικού πληθυσμού P, επαναλαμβάνονται μέχρι να πραγματοποιηθεί η καλύτερη δυνατή λύση. Στο πρόβλημα που λύσαμε, είχαμε 2 επαναλήψεις των βημάτων αυτών. Επομένως, σε κάθε επανάληψη επιβιώνουν μόνο τα αντισώματα που ανήκουν στον πληθυσμό P, ενώ όλα τα υπόλοιπα, δηλαδή οι κλώνοι ή τα αντισώματα F, F_c, S και R, διαγράφονται από τον πληθυσμό.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένας ψευδοκώδικας του αλγορίθμου.

Αλγόριθμος 5. Αλγόριθμος Επιλογής Κλώνων

Καθορισμός των παραμέτρων του αλγορίθμου

- Καθορισμός του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων
- Καθορισμός του μέγιστου αριθμού των αντισωμάτων (P)
- Καθορισμός των αριθμών R και S
- Καθορισμός των αριθμών Cr, Mr και β

Αρχικοποίηση

- Δημιουργία του αρχικού πληθυσμού (P) αντισωμάτων
- Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συναρτησης για κάθε αντίσωμα
- Ταξινόμηση των αντισωμάτων βάσει της τιμής της αντικειμενικής τους

συνάρτησης

Κύρια Φάση

do while ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων δεν έχει επιτευχθεί

Επιλογή F λύσεων από το P

Για κάθε μέλος του F, δημιουργήσε ένα σύνολο από κλώνους F_c

for κάθε κλώνο **do**

if $\text{rand}(0,1) \leq Mr$ **then**

Κάλεσε τον τελεστή υπερμετάλλαξης

endif

endfor

Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε κλώνο

Ταξινόμηση των κλώνων βάσει της τιμής της αντικειμενικής τους συνάρτησης

Επιλογή S λύσεων από το F_c

Δημιουργία ενός τυχαίου συνόλου από λύσεις R

Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε τυχαία λύση

Αντικατάσταση των χειρότερων μελών του P από καλύτερες λύσεις από τα σύνολα S και R

Επιβίωση του συνόλου P για την επόμενη επανάληψη

Διαγραφή όλων των άλλων υποσυνόλων (F , F_c , S και R) από τον πληθυσμό

enddo

Επιστροφή του καλύτερου αντισώματος (καλύτερη λύση)

Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε είναι στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab και βρίσκεται στα αρχεία **teliko.m**, ενώ στο αρχείο **antik_synartisi.m** βρίσκεται η αντικειμενική συνάρτηση.

5.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου

Το αρχείο δεδομένων που θα χρησιμοποιήσουμε παρουσιάζεται παρακάτω και παρέχει πληροφορίες για τον αρχικό χρόνο επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές σε κάθε παράδειγμα, κάτι που στο πρόβλημα μας ονομάζουμε πίνακα A.

Στην πρώτη στήλη του πίνακα που θα χρησιμοποιήσουμε, θα αναφέρουμε το αρχείο στο οποίο βρίσκεται, ενώ όλα τα δεδομένα από όλα τα παραδείγματα βρίσκονται στο αρχείο **tai20_5**. Τα στοιχεία των δεδομένων που θα χρησιμοποιήσουμε παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t.xls	54	79	16	66	58
	83	3	89	58	56
	15	11	49	31	20
	71	99	15	68	85
	77	56	89	78	53
	36	70	45	91	35
	53	99	60	13	53
	38	60	23	59	41

	27	5	57	49	69
	87	56	64	85	13
	76	3	7	85	86
	91	61	1	9	72
	14	73	63	39	8
	29	75	41	41	49
	12	47	63	56	47
	77	14	47	40	87
	32	21	26	54	58
	87	86	75	77	18
	68	5	77	51	68
	94	77	40	31	28

Πίνακας 1.Ο πίνακας Α για το πρώτο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t1.xls	26	59	78	88	69
	38	62	90	54	30
	27	44	64	47	61
	88	10	49	83	35
	95	23	47	84	53
	55	64	20	9	98
	54	47	61	30	94
	63	68	93	11	33
	23	54	36	92	77
	45	9	47	63	31
	86	30	70	62	54
	43	31	54	75	71
	43	92	87	48	78
	40	7	13	23	9
	37	14	40	85	79
	54	95	34	23	51
	35	76	55	4	76
	59	82	13	31	56
	43	91	11	13	80
	50	37	5	98	72

Πίνακας 2.Ο πίνακας Α για το δεύτερο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t2.xls	77	39	14	11	83
	94	31	21	2	13
	9	46	15	36	84

	57	18	10	30	46
	29	93	85	89	20
	79	58	46	10	33
	55	85	42	88	74
	73	58	18	22	42
	65	97	36	31	33
	86	10	2	9	71
	25	79	44	43	32
	39	93	89	91	48
	76	2	6	26	42
	24	87	3	3	99
	38	17	1	75	7
	5	18	43	99	54
	91	10	81	63	8
	29	50	57	83	73
	22	8	76	70	30
	27	26	59	84	75

Πίνακας 3.Ο πίνακας Α για το τρίτο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t3.xls	53	93	90	65	64
	19	79	92	97	38
	99	88	35	27	44
	62	77	13	25	46
	88	94	75	61	66
	93	39	55	24	31
	34	74	80	97	48
	72	46	67	61	27
	42	17	3	75	82
	65	30	93	92	51
	39	62	54	73	90
	79	77	67	21	93
	9	43	25	29	85
	26	98	77	3	36
	72	48	38	96	69
	29	14	98	51	67
	36	45	96	26	81
	48	25	20	44	18
	57	98	15	56	81
	95	30	36	31	72

Πίνακας 4.Ο πίνακας Α για το τέταρτο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t4.xls	61	27	42	13	55
	86	92	93	47	48
	16	8	32	6	56

	42	65	30	70	84
	14	34	16	19	22
	92	6	95	97	51
	67	42	58	41	43
	77	39	12	1	50
	46	2	95	57	62
	41	7	21	60	61
	78	85	74	62	10
	3	32	38	14	87
	72	14	4	90	99
	95	74	31	76	40
	53	59	62	12	91
	59	95	39	89	64
	34	48	97	37	62
	66	37	57	35	53
	42	59	9	91	33
	63	4	54	69	16

Πίνακας 5.Ο πίνακας Α για το πέμπτο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t5.xls	71	13	61	21	91
	27	11	25	8	13
	55	73	52	5	7
	90	43	72	8	95
	11	27	89	58	20
	18	33	75	59	69
	42	57	60	85	45
	64	42	28	35	44
	73	71	94	84	29
	95	3	95	97	32
	22	11	18	93	94
	53	49	73	60	84
	32	8	40	99	60
	5	3	61	29	49
	94	47	68	94	49
	12	58	75	41	65
	41	23	37	51	85
	85	79	13	87	52
	75	99	65	97	8
	38	23	7	11	58

Πίνακας 6.Ο πίνακας Α για το έκτο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t6.xls	15	28	77	1	45
	64	4	36	59	73
	64	43	57	95	59

	48	93	15	49	63
	9	1	81	90	54
	91	81	82	78	98
	27	77	98	3	39
	34	69	97	69	75
	42	52	12	99	33
	3	28	35	41	8
	11	28	84	73	86
	54	77	70	28	41
	27	42	27	99	41
	30	53	37	13	22
	9	46	59	59	43
	15	49	42	47	34
	88	15	57	8	80
	55	43	16	92	16
	50	65	11	87	37
	57	41	34	62	94

Πίνακας 7.Ο πίνακας Α για το έβδομο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t7.xls	34	5	86	28	8
	20	48	35	39	91
	57	80	5	55	45
	47	43	93	21	55
	62	34	74	25	75
	40	2	12	88	18
	74	87	40	59	59
	94	68	95	40	86
	9	28	80	90	45
	62	84	6	18	89
	86	30	92	33	11
	13	35	14	10	54
	78	42	83	59	38
	46	39	49	92	41
	83	85	36	15	64
	52	34	38	77	98
	13	36	43	31	83
	70	9	89	85	36
	40	96	94	85	61
	60	84	33	99	19

Πίνακας 8.Ο πίνακας Α για το όγδοο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t8.xls	37	59	65	70	94
	36	16	94	3	98
	1	90	96	43	63

	4	3	47	14	83
	64	76	35	26	19
	74	74	34	83	79
	32	22	84	26	54
	67	30	3	65	78
	73	89	60	47	29
	7	61	34	94	8
	78	39	70	75	38
	64	15	57	30	97
	98	69	8	1	61
	60	57	74	71	10
	89	9	13	46	37
	49	13	37	87	16
	2	71	87	78	78
	79	2	71	76	96
	79	34	89	75	9
	53	49	57	55	91

Πίνακας 9.Ο πίνακας Α για το ένατο παράδειγμα

ΜΗΧΑΝΕΣ/ΕΡΓΑΣΙΕΣ					
t9.xls	27	79	22	93	38
	92	23	93	22	84
	75	66	62	64	62
	94	5	53	81	10
	18	15	30	94	11
	41	51	34	97	93
	37	2	27	54	57
	58	81	30	82	81
	56	12	54	11	10
	20	40	77	91	40
	2	59	24	23	62
	39	32	47	32	49
	91	16	39	26	90
	81	87	66	22	34
	33	78	41	12	11
	14	41	46	23	81
	88	43	24	34	51
	22	94	23	87	21
	36	1	68	59	39
	65	93	50	2	27

Πίνακας 10.Ο πίνακας Α για το δέκατο παράδειγμα

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι καλύτερες λύσεις που βρέθηκαν μετά τη εφαρμογή του αλγορίθμου του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος. Οι λύσεις αυτές αφορούν το πρώτο παράδειγμα, δηλαδή στον πίνακα Α που βρίσκεται στο αρχείο t.xls και περιέχει τους αρχικούς χρόνους επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές, και έγιναν με σκοπό να βρεθεί ο καλύτερος πληθυσμός P και ο καλύτερος

τελεστής υπερμετάλλαξης Cr, ώστε να έχουμε τις βέλτιστες λύσεις του προβλήματος. Τα αποτελέσματα αυτά δημιουργήθηκαν μετά από 15 επαναλήψεις του αλγορίθμου που υλοποιήθηκε.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται ότι οι τιμές του τελεστή υπερμετάλλαξης Cr παίρνουν τιμές από 0.6 έως 0.9 και ο πληθυσμός P από 20 έως 290. Παρατηρούμε ότι από το 20 έως το 100 ανεβαίνουμε ανά 20, ενώ από το 100 έως το 290 ανά 10. Αυτό συμβαίνει μιας και σε μεγαλύτερο πληθυσμό, έχουμε περισσότερες πιθανότητες να πλησιάσουμε στην βέλτιστη λύση, αφού οι επιλογές είναι περισσότερες. Τέλος, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε τον πληθυσμό P, τόσο περισσότερο χρόνο χρειάζεται ο αλγόριθμος για να υλοποιηθεί. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι οι επιλογές είναι περισσότερες και ο αλγόριθμος πρέπει να κάνει περισσότερες πράξεις για να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

ΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΠΕΡΜΕΤΑΛΛΑΞΗΣ Cr	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ P	ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ
0.6	20	1393
0.7	20	1417
0.8	20	1443
0.9	20	1382
0.6	40	1364
0.7	40	1418
0.8	40	1378
0.9	40	1397
0.6	60	1375
0.7	60	1389
0.8	60	1367
0.9	60	1380
0.6	80	1411
0.7	80	1379
0.8	80	1420
0.9	80	1391
0.6	100	1377
0.7	100	1416
0.8	100	1424
0.9	100	1373
0.6	110	1392
0.7	110	1367
0.8	110	1368
0.9	110	1375
0.6	120	1386
0.7	120	1377

0.8	120	1375
0.9	120	1383
0.6	130	1400
0.7	130	1386
0.8	130	1403
0.9	130	1345
0.6	140	1359
0.7	140	1377
0.8	140	1415
0.9	140	1398
0.6	150	1377
0.7	150	1421
0.8	150	1377
0.9	150	1405
0.6	160	1357
0.7	160	1377
0.8	160	1353
0.9	160	1377
0.6	170	1398
0.7	170	1385
0.8	170	1360
0.9	170	1409
0.6	180	1374
0.7	180	1377
0.8	180	1393
0.9	180	1394
0.6	190	1377
0.7	190	1366
0.8	190	1350
0.9	190	1420
0.6	200	1389
0.7	200	1393
0.8	200	1341
0.9	200	1386
0.6	210	1378
0.7	210	<u>1340</u>
0.8	210	1390
0.9	210	1398
0.6	220	1407
0.7	220	1357
0.8	220	1401
0.9	220	1377
0.6	230	1372
0.7	230	1388

0.8	230	1360
0.9	230	1384
0.6	240	1376
0.7	240	1389
0.8	240	1365
0.9	240	1381
0.6	250	1352
0.7	250	1378
0.8	250	1392
0.9	250	1381
0.6	260	1399
0.7	260	1370
0.8	260	1374
0.9	260	1371
0.6	270	1395
0.7	270	1365
0.8	270	1425
0.9	270	1377
0.6	280	1409
0.7	280	1377
0.8	280	1358
0.9	280	1371
0.6	290	1390
0.7	290	1387
0.8	290	1370
0.9	290	1392

Πίνακας 1. Στοιχεία των αρχείων που βρήκαμε κατά την επίλυση του προβλήματος για το πρώτο παράδειγμα (στον πίνακα Α το αρχείο t.xls)

Ο πίνακας που παρουσιάζεται παρακάτω παρέχει πληροφορίες για τον αρχικό πληθυσμό P κάθε παραδείγματος, για την τιμή του τελεστή υπερμετάλλαξης Cr και για τον ελάχιστο χρόνο επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές.

Οι βέλτιστες λύσεις, δηλαδή ο ελάχιστος χρόνος επεξεργασίας των εργασιών από τις μηχανές για το κάθε παράδειγμα, όπως έχει καταγραφεί και υπάρχει στη βιβλιογραφία, είναι η στήλη βέλτιστη λύση του πίνακα που ακολουθεί. Τέλος, ο παρακάτω πίνακας μας παρέχει πληροφορίες σχετικά για η απόκλιση της λύσης που βρήκαμε σε σχέση με την στήλη βέλτιστη λύση της βιβλιογραφίας. Τα στοιχεία των δεδομένων που βρήκαμε παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΙΝΑΚΑ A	ΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΠΕΡΜΕΤΑΛ- ΛΑΞΗΣ Cr	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ P	ΛΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΛΥΣΗ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%)
t	0.7	210	1340	1278	4,6268656
t1	0.9	130	1420	1359	4,2957746
t2	0.8	190	1172	1081	7,7645051
t3	0.8	240	1436	1293	9,9582172
t4	0.7	210	1313	1235	5,9405940
t5	0.7	210	1285	1195	7,0038910
t6	0.7	210	1300	1239	4,6923076
t7	0.9	160	1319	1206	8,5670962
t8	0.8	280	1339	1230	8,1404032
t9	0.8	190	1230	1108	9,9186991

Πίνακας 2. Σύγκριση της ποιότητας των λύσεων που προέκυψαν, με τις βέλτιστες λύσεις της βιβλιογραφίας

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βασίστηκε στον αλγόριθμο επιλογής κλώνων του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος και αποτελεί ένα νέο τρόπο επίλυσης του προβλήματος ροής με ελαχιστοποίηση του κριτηρίου makespan. Όσον αφορά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, είναι αρκετά ικανοποιητικά. Για παράδειγμα για τα αρχεία t, t1, t4 και t6 η λύση η οποία βρέθηκε προσεγγίζει αρκετά καλά την βέλτιστη λύση, η οποία βρέθηκε από τη βιβλιογραφία. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από την βέλτιστη λύση προέκυψαν για τα αρχεία t2, t3, t5, t7, t8 και t9.

Ένας βασικό λόγος για τον οποίο ο αλγόριθμος παρουσιάζει τις συγκεκριμένες αποκλίσεις είναι ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται ένας πληθυσμός με βάση την θεωρία επιλογής κλώνων. Στον αλγόριθμο επιλογής κλώνων ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι δεν εμπεριέχει την διαδικασία της διασταύρωσης (cross-over), η οποία αποτελεί βασική μέθοδο της εξέλιξης ενός πληθυσμού των γενετικών αλγορίθμων. Η εξέλιξη του πληθυσμού των αντισωμάτων στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε βασίστηκε μόνο στην μετάλλαξη των κλώνων, κάτι που περιορίζει τον χώρο των λύσεων. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος με τον οποίο αρχικοποιείται ο πληθυσμός καθώς και ο τελεστής υπερμετάλλαξης Cr ίσως να επηρεάζει την ποιότητα της λύσης, μιας και μια λανθασμένη επιλογή των αρχικού πληθυσμού σε συνδυασμό με τον τελεστή υπερμετάλλαξης Cr οδηγεί και σε λύση με μεγάλη απόκλιση.

Συμπερασματικά, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν μελλοντικές εργασίες, μέσω συνδυασμού εννοιών από τον τομέα του φυσικού ανοσοποιητικού συστήματος και άλλων μεθοδολογιών οι οποίες είναι να είναι πιο αποδοτικές στην επίλυση του προβλήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] Παππής Κώστας Π., Προγραμματισμός Παραγωγής, Εκδόσεις Α. Σταμούλης, 1995.
- [2] Abbas, A. K. and A. H. Lichtman, Basic Immunology: Functions and Disorders of the Immune System, Saunders, 2004.
- [3] Abbas, A. K. and A. H. Lichtman, Cellular and Molecular Immunology, 5th edition, Saunders, 2005.
- [4] Bellanta, J. and Kadlec, J., Introduction to immunology, Chapter in the book entitled: Immunology: Basic Processes, edition, Saunders, pp. 1-15, 1985.
- [5] Hofmeyer, S. and Forrest, S., Architecture for an artificial immune system, Evolutionary Computation, 8(4), pp. 443-473, 2000.
- [6] Perelson A.S. and Weisbuch G., Immunology for Physicists, Reviews of Modern Physics, 69(4), 1997.
- [7] L.N. de Castro and F.J. Von Zuben, Artificial Immune Systems. Part I – Basic Theory and Applications. Technical Report DCA-RT 01/99, Department of Computer Engineering and Industrial Automation, School of Electrical and Computer Engineering, State University of Campinas, Brazil, 1999.
- [8] Schindler L., Kerrigan D. and Kelly J., Understanding the Immune System, Science Behind the News- National Cancer Institute , 2002.
- [9] Dipankar Dasgupta, Luis Fernando Niño, Immunological Computation, Theory and Applications, Chapter 1&2, pp. 2-29, Publisher: Taylor & Francis Group, 2009.
- [10] Michael O’ Neil, Antony Brabazon, Artificial Immune Systems, Chapter 7, In the book entitled: Biologically Inspired Algorithms for Financial Modelling, Publisher: Springer-Verlag, pp.115-127, 2004.
- [11] Engelbrecht Andries P., Artificial Immune Models, Chapter 19 in the book entitled: Computational Intelligence. An introduction, Publisher: John Wiley & Sons, pp. 425-448, 2007.
- [12] Engelbrecht Andries P., Forrest S., Perelson A.S., Allen L., and Cherukuri R., Self-Nonself Discrimination in a Computer, In Proceedings of the IEEE Symposium on Research in Security and Privacy, pp. 202–212, 1994.
- [13] Kim J. and Bentley P.J., Negative Selection and Niching by an Artificial Immune System for Network Intrusion Detection. Chapter 19 in the book entitled: Computational Intelligence. An introduction, Publisher John Wiley & Sons, pp. 458 483, 2007.

- [14] Potter M.A. and Jong K.A., The Coevolution of Antibodies for Concept Learning, In Proceedings of the Fifth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, pp. 530–539, 1998.
- [15] Gonzalez F., Dasgupta D., and Kozma R., Combining Negative Selection and Classification Techniques for Anomaly Detection, In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, volume 1, pp. 705–710, 2002.
- [16] Stewart J. and Carneiro J., The Central and Peripheral Immune Systems: Modeling and Simulation, Chapter 3 in the book entitled Artificial Immune Systems and their applications, Publisher: Springer-Verlag, pp. 47-61, 1999.
- [17] De Castro, L. and Von Zuben, F., Learning and optimization using the clonal selection principle, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Volume 3, pp.239-251, 2002.
- [18] L.N. de Castro and F.J. Von Zuben, The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications, In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computational Conference, pages 36–37, 2000.
- [19] Hofmeyr S., An Immunological Model of Distributed Detection and Its Application to Computer Security, PhD thesis, University of New Mexico, 1999.
- [20] Knight T. and Timmis J., A Multi-Layered Immune Inspired Approach to Data Mining, In Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Soft Computing, pp. 266–271, 2002.
- [21] A. Geoffrion, Proper efficiency and theory of vector maximization, Journal of Mathematical Analysis and Applications 22, pp.618–630, 1968.
- [22] E. Ulungu, J. Teghem, The two phases method: An efficient procedure to solve bi-objective combinatorial optimization problems, Foundations of Computing and Decision Sciences 20 (2), pp. 149–165, 1995.
- [23] Pinedo, M., Scheduling: Theory, Algorithms and Systems, second ed. Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- [24] Rinnooy Kan, A.H.G., Machine Scheduling Problems: Classification, Complexity and Computations. Martinus Nijhoff, The Hague, The Netherlands, 1976.
- [25] Johnson, S.M., Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included, Naval Research Logistics Quarterly 1, pp. 61–68, 1954.
- [26] Campbell, H.G., Dudek, R.A., Smith, M.L., A heuristic algorithm for the n job, m machine sequencing problem, Management Science 16 (10), B630–B637, 1970.
- [27] Dannenbring, D.G., An evaluation of flow shop sequencing heuristics. Management Science 23 (11), pp.1174–1182, 1977.

- [28] Nawaz, M., Ensore Jr., E.E., Ham, I., A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *OMEGA, The International Journal of Management Science* 11 (1), pp. 91–95, 1983.
- [29] Turner, S., Booth, D., Comparison of heuristics for flow shop sequencing. *OMEGA, The International Journal of Management Science* 15 (1), pp. 75–78, 1987.
- [30] Ruiz, R., Maroto, C., A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics, *European Journal of Operational Research* 165, pp. 479–494, 2005.
- [31] Suliman, S., A two-phase heuristic approach to the permutation flow-shop scheduling problem, *International Journal of Production Economics* 64 (1–3), pp. 143–152, 2000.
- [32] Framinan, J.M., Leisten, R., Rajendran, C., Different initial sequences for the heuristic of Nawaz, Ensore and Ham to minimize makespan, idletime or flowtime in the static permutation flowshop sequencing problem, *International Journal of Production Research* 41 (1), pp. 121–148, 2003.
- [33] Osman, I., Potts, C., Simulated annealing for permutation flow-shop scheduling. *OMEGA, The International Journal of Management Science* 17 (6), pp. 551–557, 1989.
- [34] Widmer, M., Hertz, A., A new heuristic method for the flow shop sequencing problem. *European Journal of Operational Research* 41 (2), pp. 186–193, 1989.
- [35] Taillard, E., Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem, *European Journal of Operational Research* 47 (1), pp. 67–74, 1990.
- [36] Reeves, C.R., Improving the efficiency of tabu search for machine scheduling problems, *Journal of the Operational Research Society* 44 (4), pp. 375–382, 1993.
- [37] Chen, C.-L., Vempati, V.S., Aljaber, N., An application of genetic algorithms for flow shop problems, *European Journal of Operational Research* 80 (2), pp. 389–396, 1995.
- [38] Reeves, C.R., A genetic algorithm for flowshop sequencing, *Computers and Operations Research* 22 (1), pp. 5–13, 1995.
- [39] Wang, L., Zheng, D.Z., An effective hybrid heuristic for flow shop scheduling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21, pp. 38–44, 2003.
- [40] Aldowaisan, T., Allahvedi, A., New heuristics for no-wait flowshops to minimize makespan, *Computers and Operations Research* 30 (8), pp. 1219–1231, 2003.
- [41] Stützle, T., Applying iterated local search to the permutation flow shop problem. Technical report, AIDA-98-04, FG Intellektik, FB Informatik, TU Darmstadt, 1998.

- [42] Chandrasekharan, R., Ziegler, H., Ant-colony algorithms for permutation flowshop scheduling to minimize makespan/ total flowtime of jobs, *European Journal of Operational Research* 155 (2), pp.426–438, 2004.
- [43] Ruiz, R., Maroto, C., Alcaraz, J., Solving the flowshop scheduling problem with sequence dependent setup times using advanced metaheuristics, *European Journal of Operational Research* 165, pp. 34–54, 2005.
- [44] Ruiz, R., Maroto, C., A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility, *European Journal of Operational Research* 169, pp. 781–800, 2006.
- [45] Werner, F., On the heuristic solution of the permutation flow shop problem by path algorithms, *Computers and Operations Research* 20 (7), pp. 707–722, 1993.
- [46] Rubén Ruiz, Thomas Stützle, A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 2006.
- [47] Anurag Agarwal, Selcuk Colak, Enes Eryarsoy, Improvement heuristic for the flow-shop scheduling problem: An adaptive-learning approach, *European Journal of Operational Research*, 2005.
- [48] Ammar Oulamara, Makespan minimization in a no-wait flow shop problem with two batching machines, *Computers & Operations Research*, 2005.
- [49] M. Fatih Tasgetiren, Yun-Chia Liang, Mehmet Sevkli, Gunes Gencyilmaz, A particle swarm optimization algorithm for makespan and total flowtime minimization in the permutation flowshop sequencing problem, *European Journal of Operational Research*, 2006.
- [50] S.M.A. Suliman, A two-phase heuristic approach to the permutation flow-shop scheduling problem, *Int. J. Production Economics*, 2000.