

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΔΡΑΣΗΣ  
ΜΕ ΤΕΝΙΚΕΣ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ**

Σόλωνας Πολυκάρπου

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ**



**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Μάιος 2018**

# **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ**

## **ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

### **Επίλυση Προβλημάτων Προγραμματισμού Δράσης με Τεχνικές Ικανοποίησης Περιορισμών**

**Σόλωνας Πολυκάρπου**

Επιβλέπων Καθηγητής  
Δρ. Γιάννης Δημόπουλος

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των  
απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του  
Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2018

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Δρ. Γιάννη Δημόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε τόσο κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και κατά τη διάρκεια των επιμέρους μαθημάτων τα οποία δίδασκε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Ακαδημαϊκού και Διοικητικού Προσωπικού του Τμήματος Πληροφορικής, τα οποία με βοήθησαν να αντεπεξέλθω στις απαιτήσεις του πτυχίου κατανοώντας τις ιδιαιτερότητες της φοίτησής μου.

Πάνω από όλους όμως θέλω να ευχαριστήσω τη γυναίκα μου και την κόρη μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια. Θα ήθελα ακόμη να τους απολογηθώ για τις ατελείωτες ώρες που πέρασα μακριά τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευχαριστώ,

Σόλωνας Πολυκάρπου

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τα προβλήματα προγραμματισμού δράσης, τα οποία αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της Τεχνητής Νοημοσύνης. Στόχος ενός προβλήματος προγραμματισμού δράσης είναι να εντοπίσει τη σειρά εκείνη των δράσεων, η οποία θα μετατρέψει την αρχική κατάσταση του προβλήματος στην επιθυμητή κατάσταση. Η εύρεση αυτής της ακολουθίας δράσεων με αλγόριθμους οι οποίοι έψαχναν στα τυφλά, ήταν σχεδόν αδύνατη σε πολύπλοκα προβλήματα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων, πιο αποτελεσματικών αλγόριθμων.

Οι νέοι αυτοί αλγόριθμοι εκμεταλλεύονται τη λογική δομή του προβλήματος και προσπαθούν να το διασπάσουν σε μικρότερα υποπροβλήματα τα οποία μπορούν να λυθούν ξεχωριστά. Για να το πετύχουν αυτό χρειάζονται μια γλώσσα η οποία να είναι αρκετά εκφραστική, για να μπορεί να περιγράψει ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων, αλλά και αρκετά περιοριστική ούτως ώστε οι διάφοροι αλγόριθμοι να μπορούν να λειτουργήσουν επάνω της. Μια τέτοια γλώσσα είναι η γλώσσα PDDL (Planning Domain Definition Language), η οποία αναπαριστά την κάθε κατάσταση σαν ένα σύνολο από μεταβλητές.

Ένα Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών (ΠΙΠ) αποτελείται από μεταβλητές, τα πεδία τιμών αυτών των μεταβλητών και περιορισμούς ανάμεσα στις μεταβλητές αυτές. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ήταν η μετατροπή ενός προβλήματος Προγραμματισμού Δράσης σε ένα Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών, χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές οι οποίες αναπαριστούν το πρόβλημα στη γλώσσα PDDL, και η επίλυσή του με τεχνικές και αλγόριθμους των ΠΙΠ.

Μέσα από την Διπλωματική αυτή εργασία, προκύπτει ότι η επίλυση των Προβλημάτων Προγραμματισμού Δράσης με Τεχνικές Ικανοποίησης Περιορισμών, μας δίνει πάντοτε ένα πλάνο με βέλτιστο μήκος, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εκτέλεση ανεξάρτητων δράσεων. Παράλληλα όμως, αναλώνει αρκετό χρόνο σε ασυνεπή προβλήματα (ΠΙΠ τα οποία δεν έχουν λύση), αποτέλεσμα το οποίο μπορεί να γίνει «τροφή» για μελλοντική εργασία.

## Περιεχόμενα

|                   |                                                                |           |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Κεφάλαιο 1</b> | <b>Εισαγωγή.....</b>                                           | <b>1</b>  |
|                   | 1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας                           | 1         |
|                   | 1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας                             | 2         |
| <b>Κεφάλαιο 2</b> | <b>Προγραμματισμός Δράσης .....</b>                            | <b>4</b>  |
|                   | 2.1 Εισαγωγή                                                   | 4         |
|                   | 2.2 Η γλώσσα PDDL                                              | 6         |
|                   | 2.2.1 Αναπαράσταση κατάστασης                                  | 6         |
|                   | 2.2.2 Αναπαράσταση των δράσεων                                 | 7         |
|                   | 2.2.3 Αναπαράσταση στόχων                                      | 7         |
|                   | 2.2.4 Προς τα Εμπρός Αναζήτηση (Forward state-space search)    | 8         |
|                   | 2.2.5 Προς τα Πίσω Αναζήτηση (Backward relevant-states search) | 9         |
|                   | 2.3 Παράδειγμα Προβλήματος Προγραμματισμού Δράσης              | 10        |
| <b>Κεφάλαιο 3</b> | <b>Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών.....</b>                | <b>14</b> |
|                   | 3.1 Εισαγωγή                                                   | 15        |
|                   | 3.2 Είδη περιορισμών                                           | 16        |
|                   | 3.3 Επίλυση Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών               | 16        |
|                   | 3.3.1 Αναγωγή προβλημάτων                                      | 16        |
|                   | 3.3.2 Αναζήτηση                                                | 17        |
|                   | 3.3.3 Σύνθεση λύσεων                                           | 17        |
|                   | 3.4 Παραδείγματα Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών          | 17        |
|                   | 3.4.1 Πρόβλημα Χρωματισμού Χάρτη                               | 18        |
|                   | 3.4.2 Πρόβλημα N-βασιλισσών                                    | 19        |
|                   | 3.5 Διάδοση Περιορισμών και περιορισμός του χώρου αναζήτησης   | 20        |
|                   | 3.5.1 Συνέπεια κόμβου                                          | 21        |
|                   | 3.5.2 Συνέπεια ακμής                                           | 22        |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 3.5.3 Συνέπεια μονοπατιού                                 | 22 |
| 3.5.4 K – Συνέπεια                                        | 23 |
| 3.6 Βασικοί αλγόριθμοι συνέπειας ακμής                    | 23 |
| 3.6.1 Ο αλγόριθμος AC3                                    | 23 |
| 3.6.2 Ο αλγόριθμος AC2001                                 | 24 |
| 3.6.3 Ο αλγόριθμος AC3rm                                  | 25 |
| 3.6.4 Ο αλγόριθμος AC3bit+rm                              | 27 |
| 3.6.5 Ο αλγόριθμος Forward Checking (FC)                  | 27 |
| 3.7 Άλλες τεχνικές βελτίωσης του χρόνου επίλυσης ενός ΠΠΠ | 28 |
| 3.7.1 Στρατηγικές αναζήτησης                              | 28 |
| 3.7.1.1 Η στρατηγική αναζήτησης intVarSearch              | 29 |
| 3.7.1.2 Η στρατηγική αναζήτησης<br>activityBasedSearch    | 29 |
| 3.7.2 Στρατηγικές επανεκκίνησης                           | 29 |
| 3.7.2.1 Η στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical<br>Restart | 30 |
| 3.7.2.2 Η στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart           | 30 |

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Κεφάλαιο 4 Μοντελοποίηση Προβλημάτων Προγραμματισμού Δράσης</b>  |           |
| <b>σε Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών.....</b>                  | <b>31</b> |
| 4.1 Εισαγωγή                                                        | 31        |
| 4.2 Ο επιλυτής Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών<br>Choco Solver | 32        |
| 4.3 Το αρχείο output.sas                                            | 33        |
| 4.3.1 Μετρικό τμήμα αρχείου output.sas                              | 33        |
| 4.3.2 Τμήμα Μεταβλητών αρχείου output.sas                           | 34        |
| 4.3.3 Τμήμα Αρχικής Κατάστασης αρχείου output.sas                   | 34        |
| 4.3.4 Τμήμα Τελικής Κατάστασης αρχείου output.sas                   | 35        |
| 4.3.5 Τμήμα Δράσεων αρχείου output.sas                              | 36        |
| 4.3.6 Τμήμα Αξιωμάτων αρχείου output.sas                            | 37        |
| 4.4 Μοντελοποίηση του προβλήματος στην Choco                        | 38        |
| 4.4.1 Μεταβλητές και Πεδία Ορισμών τους                             | 39        |
| 4.4.2 Περιορισμοί                                                   | 40        |

|                       |                                                                                                                     |               |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Κεφάλαιο 5</b>     | <b>Πειραματικά Αποτελέσματα.....</b>                                                                                | <b>46</b>     |
| 5.1                   | Εισαγωγή                                                                                                            | 46            |
| 5.2                   | Χρόνοι εκτέλεσης με τις προκαθορισμένες στρατηγικές αναζήτησης και επανεκκίνησης του προβλήματος                    | 47            |
| 5.3                   | Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και χωρίς στρατηγική επανεκκίνησης                        | 49            |
| 5.4                   | Χρόνοι εκτέλεσης με την προκαθορισμένη στρατηγική αναζήτησης και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart | 50            |
| 5.5                   | Χρόνοι εκτέλεσης με την προκαθορισμένη στρατηγική αναζήτησης και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart        | 52            |
| 5.6                   | Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart    | 54            |
| 5.7                   | Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart           | 56            |
| 5.8                   | Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης activityBasedSearch                                                    | 57            |
| <br><b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> | <br><b>Βελτιώσεις Βασικού Μοντέλου.....</b>                                                                         | <br><b>58</b> |
| 6.1                   | Εισαγωγή                                                                                                            | 58            |
| 6.2                   | Προσέγγιση μήκους πλάνου                                                                                            | 60            |
| 6.3                   | Περισσότερη πληροφόρηση                                                                                             | 63            |
| <br><b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b> | <br><b>Συμπεράσματα .....</b>                                                                                       | <br><b>71</b> |
| 7.1                   | Εισαγωγή                                                                                                            | 71            |
| 7.2                   | Γενικά Συμπεράσματα                                                                                                 | 71            |
| 7.3                   | Μελλοντική εργασία                                                                                                  | 73            |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>Βιβλιογραφία .....</b> | <b>75</b> |
|---------------------------|-----------|

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| <b>Παράρτημα Α.....</b> | <b>A-1</b> |
|-------------------------|------------|

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| <b>Παράρτημα Β.....</b> | <b>B-1</b> |
|-------------------------|------------|



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

---

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| 1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας | 1 |
| 1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας   | 2 |

---

### 1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Ο προγραμματισμός δράσης στην Τεχνητή Νοημοσύνη, είναι η λήψη αποφάσεων από έξυπνα πλάσματα, όπως ρομπότ, άνθρωποι ή προγράμματα υπολογιστών καθώς προσπαθούν να επιτύχουν κάποιο στόχο. Περιλαμβάνει την επιλογή μιας σειράς ενεργειών οι οποίες θα μετατρέψουν, βήμα προς βήμα, την κατάσταση του κόσμου έτσι ώστε να ικανοποιήσει το στόχο. Ο κόσμος θεωρείται ότι αποτελείται από ατομικά γεγονότα (state variables), και οι ενέργειες κάνουν κάποια από αυτά τα γεγονότα αληθή και κάποια ψευδή.

Παρόλο που το πιο πάνω αποτελεί την πιο απλή μορφή ενός προβλήματος προγραμματισμού δράσης, εντούτοις πιο ρεαλιστικά προβλήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το βασικό πρόβλημα ως υποδιαδικασία, ή γενικότερα προβλήματα μπορούν να μειωθούν σε αυτό. Για παράδειγμα, ο χρονικός προγραμματισμός μπορεί συχνά να μειωθεί άμεσα στη βασική περίπτωση ή η βασική περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπο-διαδικασία [4, 14].

Για το λόγο αυτό, ο προγραμματισμός δράσης αποτελεί ένα μεγάλο κεφάλαιο της Τεχνητής Νοημοσύνης και, όπως έχουν δείξει αρκετοί ερευνητές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων όπως οδήγηση, πτήση,

περπάτημα ή χειρισμός αντικειμένων [5, 1, 20]. Ταυτόχρονα, τα Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ σύνολο πραγματικών προβλημάτων [6].

Με βάση τα πιο πάνω, σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων Προγραμματισμού Δράσης με Τεχνικές Ικανοποίησης Περιορισμών, με στόχο την εύρεση ενός βέλτιστου πλάνου το οποίο επιτρέπει την εκτέλεση ταυτόχρονων δράσεων.

## **1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας**

Η εργασία αυτή ξεκινά με την εισαγωγή στον Προγραμματισμό Δράσης και των βασικών αλγορίθμων που χρησιμοποιεί για την εύρεση ενός πλάνου (Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η δομή ενός Προβλήματος Ικανοποίησης Περιορισμών, τα είδη των περιορισμών καθώς και οι βασικές τεχνικές επίλυσης τέτοιων προβλημάτων. Ταυτόχρονα, γίνεται αναφορά σε δύο κλασσικά παραδείγματα Προβλήματος Ικανοποίησης Περιορισμών (το «πρόβλημα του Χρωματισμού Χάρτη» και το «Πρόβλημα των N-βασιλισσών») καθώς επίσης και στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εύρεση λύσης.

Ακολούθως, στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται αρχικά ο επιλυτής Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών Choco Solver και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί, ενώ έπεται η περιγραφή του αρχείου output.sas το οποίο αποτελεί τη βάση για τη μοντελοποίηση του προβλήματος. Στη συνέχεια περιγράφεται η μοντελοποίηση του προβλήματος Προγραμματισμού Δράσης στην Choco. Συγκεκριμένα περιγράφονται οι μεταβλητές και τα πεδία ορισμών τους καθώς και οι περιορισμοί μεταξύ των μεταβλητών και πώς αυτά προκύπτουν μέσα από το αρχείο output.sas.

Έπειτα, στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της αξιολόγησης της μοντελοποίησης, ενώ στο Κεφάλαιο 6 προτείνουμε κάποιες μεθόδους βελτιστοποίησης του χρόνου επίλυσης των προβλημάτων Προγραμματισμού Δράσης τα οποία κωδικοποιούνται ως Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών. Τέλος, ολοκληρώνουμε την εργασία με το Κεφάλαιο 7 στο οποίο παρουσιάζουμε τα

συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν μέσα από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ενώ παράλληλα προτείνουμε κάποιες ιδέες για μελλοντική εργασία ως προέκταση της διπλωματικής αυτής.

## Κεφάλαιο 2

### Προγραμματισμός Δράσης

---

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Εισαγωγή                                                   | 4  |
| 2.2 Η γλώσσα PDDL                                              | 6  |
| 2.2.1 Αναπαράσταση κατάστασης                                  | 6  |
| 2.2.2 Αναπαράσταση των δράσεων                                 | 7  |
| 2.2.3 Αναπαράσταση στόχων                                      | 7  |
| 2.2.4 Προς τα Εμπρός Αναζήτηση (Forward state-space search)    | 8  |
| 2.2.5 Προς τα Πίσω Αναζήτηση (Backward relevant-states search) | 9  |
| 2.3 Παράδειγμα Προβλήματος Προγραμματισμού Δράσης              | 10 |

---

#### 2.1 Εισαγωγή

«Προγραμματισμός είναι η λογική πλευρά της Δράσης. Είναι μια αφηρημένη, σαφής διαδικασία διαβούλευσης, η οποία επιλέγει και οργανώνει τις δράσεις, προσδοκώντας στα αναμενόμενα αποτελέσματά τους. Η διαβούλευση αυτή στοχεύει στην όσο το δυνατόν καλύτερη επίτευξη ορισμένων προκαθορισμένων στόχων. Ο αυτοματοποιημένος προγραμματισμός αποτελεί την περιοχή εκείνη της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI), η οποία μελετά υπολογιστικά αυτή τη διαβούλευση». [6]

Με άλλα λόγια, ο Προγραμματισμός Δράσης είναι η επινόηση ενός πλάνου, μιας σειράς από δράσεων δηλαδή, με απώτερο σκοπό να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος στόχος ή μια συγκεκριμένη κατάσταση (goal state). Επιπλέον, ο προγραμματισμός δράσης είναι ένα κρίσιμο κομμάτι της Τεχνητής Νοημοσύνης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που κυμαίνονται από τον έλεγχο διαστημικών οχημάτων

και ρομπότ μέχρι και την ανάπτυξη επιχειρήσεων για αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης ή απλά για να παίζει κάποιος ένα παιχνίδι μπριζ [6, 18].

Σε ένα πρόβλημα προγραμματισμού δράσης, έχουμε μια αρχική κατάσταση, ένα σύνολο από δράσεις οι οποίες μπορούν να εκτελεστούν (σε κάθε κατάσταση μόνο ένα υποσύνολο του συνόλου δράσεων μπορεί να εκτελεστεί) και μία επιθυμητή τελική κατάσταση στην οποία θέλουμε να φτάσουμε. Με άλλα λόγια, ένα πρόβλημα προγραμματισμού δράσης ορίζει ένα πρόβλημα αναζήτησης, του οποίου απώτερος σκοπός είναι να βρει το σύνολο εκείνο των δράσεων, οι οποίες όταν εκτελεστούν θα μας οδηγήσουν από την αρχική στην τελική κατάσταση. Όπως αναφέρουν οι Russell & Norvig (2009, p.392), «ο προγραμματισμός δράσης συνδυάζει δύο μεγάλες περιοχές της Τεχνητής Νοημοσύνης: την αναζήτηση και τη λογική». Για το λόγο αυτό, ο τομέας της Τεχνητής Νοημοσύνης της επιστήμης της Πληροφορικής, έχει αναπτύξει με το πέρασμα των χρόνων, διάφορους αλγόριθμους για την επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης [18].

Οι αρχικοί αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν ήταν αλγόριθμοι οι οποίοι έψαχναν τυφλά στο χώρο αναζήτησης (ως χώρος αναζήτησης ορίζεται το υποσύνολο του συνόλου των καταστάσεων οι οποίες είναι προσβάσιμες από την αρχική κατάσταση) για να βρουν την τελική κατάσταση. Τέτοιου είδους αλγόριθμοι (π.χ. αναζήτηση κατά βάθος, αναζήτηση κατά πλάτος) αυξάνουν εκθετικά το χώρο αναζήτησης σε πολύπλοκα προβλήματα και λόγω του ότι αναζητούν στα τυφλά, τους κατέστησε μη εφαρμόσιμους σε τέτοια πολύπλοκα προβλήματα.

Αφού οι αλγόριθμοι τυφλής αναζήτησης παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα σε πολύπλοκα προβλήματα, άλλοι «πιο έξυπνοι» αλγόριθμοι εμφανίστηκαν για να υπερπηδήσουν αυτά τα μειονεκτήματα. Τέτοιοι αλγόριθμοι, όπως ο  $A^*$  για παράδειγμα, χρησιμοποιούν κάποια ευρετική συνάρτηση με την οποία αξιολογούν τις προσβάσιμες από την υπάρχουσα κατάσταση καταστάσεις, και συνεχίζουν την αναζήτησή τους με βάση την αξιολόγηση αυτή, παρά στα τυφλά. Οι αλγόριθμοι αυτοί όμως βασίζονται στην ατομική αναπαράσταση των καταστάσεων και επομένως χρειάζονται καλές ευρετικές συναρτήσεις, για να είναι αποδοτικοί. Μια από τις βασικότερες ιδέες που χρησιμοποιείται για τον ορισμό καλών ευρετικών συναρτήσεων, είναι η έννοια της

διάσπασης· ο χωρισμός δηλαδή του προβλήματος σε μικρότερα υποπροβλήματα, τα οποία μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα [18].

## **2.2 Η γλώσσα PDDL**

Για να μπορέσουν οι διάφοροι αλγόριθμοι να εκμεταλλευτούν τη λογική δομή του προβλήματος (καταστάσεις, δράσεις και στόχοι), χρειάζονται μια γλώσσα η οποία από τη μια να είναι αρκετά εκφραστική, για να μπορεί να περιγράψει ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων, και από την άλλη αρκετά περιοριστική ούτως ώστε οι διάφοροι αλγόριθμοι να μπορούν να λειτουργήσουν επάνω της [17]. Μια τέτοια γλώσσα είναι η γλώσσα PDDL (Planning Domain Definition Language), η οποία αναπαριστά την κάθε κατάσταση σαν ένα σύνολο από μεταβλητές.

Όπως προαναφέρθηκε, ένα πρόβλημα Προγραμματισμού Δράσης, ορίζεται από τρεις περιγραφές: την αρχική κατάσταση, των στόχων και των διαθέσιμων δράσεων. Πριν συνεχίσουμε με την περιγραφή των παραπάνω, αξίζει να αναφέρουμε ορισμένες παραδοχές που ισχύουν στη γλώσσα PDDL :

- α) Ο κόσμος είναι ντετερμινιστικός (deterministic environment). Τα αποτελέσματα δηλαδή της κάθε δράσης είναι από πριν γνωστά.
- β) Έχουμε μια πλήρη γνώση για την τρέχουσα κατάσταση του κόσμου (fully observable).
- γ) Ο κόσμος είναι στατικός (static environment). Ο κόσμος μεταβάλλεται μόνο από τις ενέργειες του συστήματος σχεδιασμού.
- δ) Ο κόσμος είναι κλειστός (closed-world assumption). Οτιδήποτε δεν δηλωθεί ως αληθές, θα θεωρείται ψευδές.

Στη συνέχεια θα δείξουμε πώς με τη γλώσσα PDDL, μπορούμε να περιγράψουμε τις καταστάσεις, τις ενέργειες και τα αποτελέσματά τους και τους στόχους.

### **2.2.1 Αναπαράσταση κατάστασης**

Στη γλώσσα PDDL, η κάθε κατάσταση του κόσμου εκφράζεται ως μια σύζευξη από κατηγορήματα, τα οποία δηλώνουν τι ισχύει στη συγκεκριμένη κατάσταση. Τα

κατηγορήματα αυτά μπορεί να είναι κατηγορήματα Προτασιακής Λογικής (π.χ. η σύζευξη  $\text{Rich} \wedge \text{Famous}$  υποδηλώνει ότι στην συγκεκριμένη κατάσταση κάποιος είναι και πλούσιος και διάσημος) ή κατηγορήματα Λογικής Πρώτης Τάξης (π.χ. η σύζευξη  $\text{At}(\text{Robot1}, \text{Room2}) \wedge \text{At}(\text{Ladder1}, \text{Room2})$  δείχνει ότι και το ρομπότ1 και η σκάλα1 βρίσκονται στο δωμάτιο 2).

### 2.2.2 Αναπαράσταση των δράσεων

Οι δράσεις στη PDDL εκφράζονται ως μια τριάδα  $o = (\text{name}(o), \text{precond}(o), \text{effects}(o))$ , όπου  $\text{name}(o)$  είναι το όνομα της δράσης μαζί με όλες τις μεταβλητές που εμφανίζονται στη δράση,  $\text{precond}(o)$  είναι μια λίστα με τις προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για να εκτελεστεί η συγκεκριμένη δράση και  $\text{effects}(o)$  είναι μια λίστα με τα αποτελέσματα της δράσης. Ένα παράδειγμα αναπαράστασης δράσης φαίνεται παρακάτω.

Action (Move(r, from, to)

PRECOND:  $\text{Adjacent}(\text{from}, \text{to}) \wedge \text{At}(\text{r}, \text{from}) \wedge \text{Empty}(\text{to})$

EFFECTS:  $\text{At}(\text{r}, \text{to}) \wedge \text{Empty}(\text{from}) \wedge \neg \text{Empty}(\text{to}) \wedge \neg \text{At}(\text{r}, \text{from})$ )

Στο πιο πάνω παράδειγμα, παρουσιάζεται η δράση η οποία μετακινεί ένα πλακίδιο από μία θέση σε κάποια άλλη. Για να εκτελεστεί η δράση αυτή, οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν είναι ότι οι δύο θέσεις στις οποίες θα μετακινηθεί το πλακίδιο πρέπει να εφάπτονται, το πλακίδιο να βρίσκεται στην αρχική θέση και η τελική θέση να είναι κενή. Τα αποτελέσματα της δράσης αυτής είναι ότι το πλακίδιο βρίσκεται τώρα στην τελική θέση, η οποία δεν είναι πλέον άδεια, και ότι η αρχική θέση είναι άδεια με το πλακίδιο να μην βρίσκεται σε αυτή.

### 2.2.3 Αναπαράσταση στόχων

Οι στόχοι αναπαρίστανται και αυτοί σαν μια σύζευξη κατηγορημάτων (θετικά ή αρνητικά), τα οποία μπορεί, αλλά όχι απαραίτητα, να περιλαμβάνουν μεταβλητές. Για παράδειγμα ο στόχος  $\text{At}(p, \text{SFO}) \wedge \text{Plane}(p)$  ικανοποιείται αν ένα οποιοδήποτε αεροπλάνο βρίσκεται στο Σαν Φρανσίσκο, ενώ αντίθετα ο στόχος  $\text{At}(\text{Airbus\_A380}, \text{SFO}) \wedge \text{Plane}(\text{Airbus\_A380})$  ικανοποιείται μόνο όταν ένα αεροπλάνο τύπου Airbus A380 βρίσκεται στο αεροδρόμιο του Σαν Φρανσίσκο. Ένα πρόβλημα ικανοποίησης

περιορισμών θεωρείται ότι έχει λυθεί, αν και μόνο αν φτάσουμε σε μία κατάσταση η οποία περιέχει όλους τους στόχους. Π.χ. η κατάσταση  $\text{Rich} \wedge \text{Famous} \wedge \text{Miserable}$  ικανοποιεί το στόχο  $\text{Rich} \wedge \text{Famous}$ .

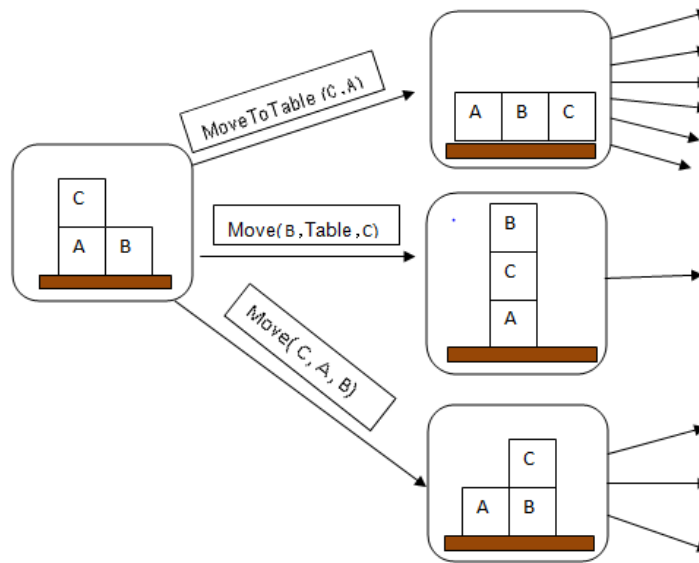
Όπως προαναφέρθηκε, σε μία κατάσταση μόνο ένα υποσύνολο του συνόλου των δράσεων μπορεί να εκτελεστεί (το υποσύνολο στο οποίο οι προϋποθέσεις των δράσεων είναι αληθείς). Επομένως, σκοπός κάποιου σχεδιαστή (planner) είναι να βρει το πλάνο εκείνο το οποίο θα μετατρέψει τις τιμές των μεταβλητών της αρχικής κατάστασης στις επιθυμητές τιμές της τελικής κατάστασης.

Οι σχεδιαστές (planners) χρησιμοποιούν δύο βασικά είδη αναζήτησης: την *Προς τα Εμπρός Αναζήτηση* (Forward state-space search) και την *Προς τα Πίσω Αναζήτηση* (Backward relevant-states search). Η βασική τους διαφορά, όπως άλλωστε υποδηλώνει και το όνομά τους, είναι ότι το μεν πρώτο είδος αναζήτησης ξεκινά από την αρχική κατάσταση με στόχο να φτάσει στην τελική, ενώ το δε δεύτερο είδος ξεκινώντας από το στόχο προσπαθεί να φτάσει στην αρχική κατάσταση. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των πιο πάνω αλγορίθμων.

#### **2.2.4 Προς τα Εμπρός Αναζήτηση (Forward state-space search)**

Στην αναζήτηση αυτή, ο σχεδιαστής ξεκινά από την αρχική κατάσταση και εφαρμόζει σε αυτή όλες τις δράσεις οι οποίες δύναται να εκτελεστούν (οι δράσεις δηλαδή των οποίων οι προϋποθέσεις ικανοποιούνται στην αρχική κατάσταση). Με την εφαρμογή αυτή των δράσεων δημιουργούνται νέες καταστάσεις στις οποίες εφαρμόζεται επαναληπτικά η ίδια διαδικασία μέχρις ότου να βρεθεί μία κατάσταση η οποία να ικανοποιεί τους στόχους. Τα προβλήματα προγραμματισμού δράσης έχουν συχνά μεγάλο χώρο αναζήτησης, με αποτέλεσμα η εμπρόσθια αναζήτηση να θεωρείται, από το 1961 περίπου μέχρι και το 1998, ανεπαρκής [18]. Ένα παράδειγμα εμπρόσθιας αναζήτησης φαίνεται στην εικόνα 2.1 πιο κάτω

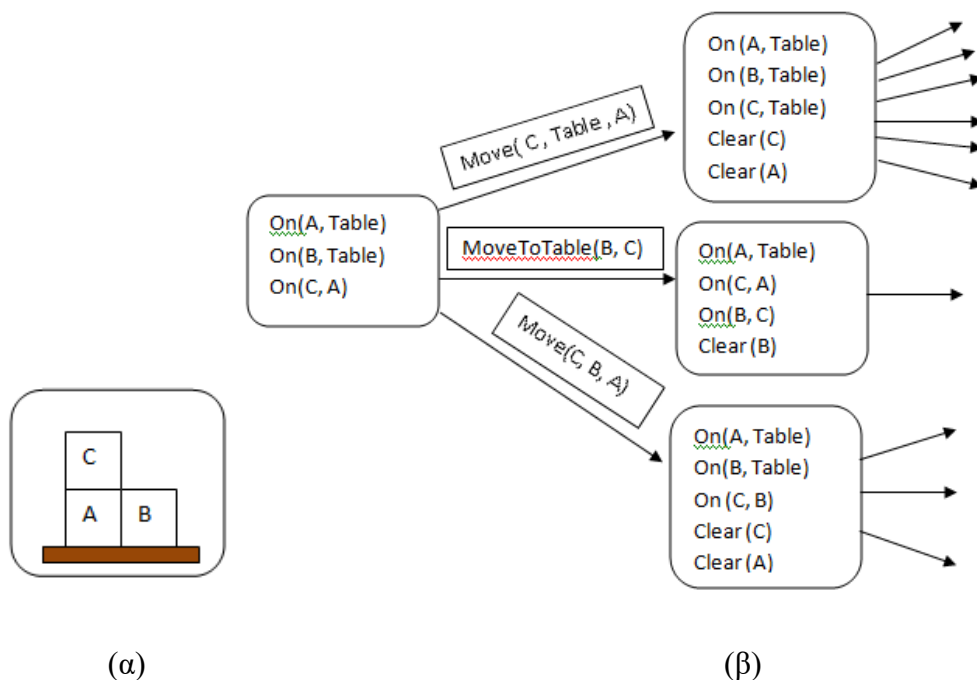




Εικόνα 2.1 – Παράδειγμα εμπρόσθιας αναζήτησης

### 2.2.5 Προς τα Πίσω Αναζήτηση (Backward relevant-states search)

Σε αυτού του είδους αναζήτησης, ο σχεδιαστής ξεκινά από την τελική κατάσταση και επιλέγει τις δράσεις εκείνες οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τουλάχιστον ένα από τους στόχους της τελικής κατάστασης, ενώ παράλληλα δεν διαγράφουν κανένα από τους στόχους της τελικής κατάστασης. Έστω ότι η τελική κατάσταση στην οποία επιθυμούμε να φτάσουμε, έχει ένα σύνολο από στόχους, έστω το  $\Sigma$ , οι οποίοι πρέπει να ικανοποιηθούν. Στην Προς τα Πίσω Αναζήτηση, ο σχεδιαστής θα επιλέξει μία ενέργεια, έστω  $E$ , η οποία θα έχει στη λίστα effects (όπως αυτή ορίστηκε πιο πάνω) τουλάχιστον ένα από τους στόχους του  $\Sigma$ . Ακολούθως, θα αφαιρεθεί ο στόχος (ή οι στόχοι) αυτός από το σύνολο  $\Sigma$  και θα προστεθούν σε αυτό όλες οι προϋποθέσεις της  $E$  (αυτές που αποτελούν τη λίστα precond), δίνοντάς μας έτσι το νέο σύνολο στόχων  $\Sigma'$  που πρέπει να ικανοποιηθούν. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται επαναληπτικά μέχρις ότου το σύνολο  $\Sigma'$  που προκύπτει να περιέχει όλα τα δυναμικά γεγονότα της αρχικής κατάστασης. Ας δούμε τώρα ένα παράδειγμα Προς τα Πίσω Αναζήτησης. Έστω ότι η τελική – επιθυμητή κατάσταση είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 2.2(α), η οποία ορίζεται από το σύνολο των στόχων  $\Sigma = \{On(A, Table), On(B, Table), On(C, A)\}$ . Στην εικόνα 2.2(β) φαίνεται το δέντρο αναζήτησης που προκύπτει με την Προς τα Πίσω Αναζήτηση.



Εικόνα 2.2 – Παράδειγμα Προς τα Πίσω Αναζήτησης

Καθώς η Προς τα Πίσω Αναζήτηση εξετάζει μόνο τις ενέργειες οι οποίες είναι σχετικές με το στόχο – τελική κατάσταση (συνεισφέρουν δηλαδή στο στόχο), η διακλάδωση του δέντρου αναζήτησης (και συνεπώς ο χώρος αναζήτησης) είναι μικρότερος από αυτόν της εμπρόσθιας αναζήτησης [18].

Όπως οι Rintanen & Hoffmann (2001) αναφέρουν, «πολλοί αλγόριθμοι αναζήτησης λειτουργούν με το να δημιουργούν σταδιακά ένα πλάνο μέχρι αυτό να ολοκληρωθεί, και οπισθοχωρούν όταν κάποιο συγκεκριμένο ατελής πλάνο δεν μπορεί να επεκταθεί σε πλήρες πλάνο». Το ίδιο συμβαίνει και με την προς τα εμπρός και προς τα πίσω αναζήτηση που περιγράψαμε πιο πάνω. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να περιορίσουμε το δέντρο αναζήτησης είτε περιορίζοντας το βάθος του, είτε το βαθμό διακλάδωσής του, γιατί οποιαδήποτε γραμμική μείωση σε ένα από αυτά τα δύο, οδηγεί σε εκθετική μείωση του μεγέθους του δέντρου αναζήτησης [16].

### 2.3 Παράδειγμα Προβλήματος Προγραμματισμού Δράσης

Ένα από τα πιο γνωστά προβλήματα Προγραμματισμού Δράσης, είναι το πρόβλημα του «Κόσμου των Κύβων». Στο πρόβλημα αυτό υπάρχουν διάφοροι κύβοι οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε ένα τραπέζι. Οι κύβοι αυτοί μπορούν να στοιβάζονται, αλλά μόνο

ένας κύβος μπορεί να βρίσκεται ακριβώς πάνω από έναν άλλο κύβο. Μπορούμε να μετακινούμε τους κύβους είτε πάνω στο τραπέζι, είτε πάνω σε κάποιο άλλο κύβο. Για να μπορέσουμε να πάρουμε ένα κύβο πρέπει αυτός ο κύβος να μην έχει κάποιον άλλο κύβο πάνω του. Στόχος του προβλήματος είναι να δημιουργήσουμε μία ή περισσότερες στοίβες στις οποίες καθορίζουμε ποιος κύβος είναι πάνω σε ποιον.

Έστω η αρχική και τελική κατάσταση της εικόνας 2.3 πιο κάτω



Εικόνα 2.3 – Αρχική και τελική κατάσταση στον «Κόσμο των Κύβων»

Για να λύσουμε το πιο πάνω πρόβλημα με κάποιο επιλυτή προβλημάτων προγραμματισμού δράσης (π.χ. LAMA), πρέπει να το αναπαραστήσουμε στη γλώσσα PDDL. Αρχικά καθορίζουμε τα κατηγορήματα και τις επιτρεπτές κινήσεις όπως φαίνεται πιο κάτω

(define (domain strips-blocksworld)

(:requirements :strips)

(:predicates

(on ?x ?y) (clear ?x) (block ?x))

(:action move

:parameters (?b ?x ?y)

:precondition (and (block ?b) (clear ?b) (on ?b ?x) (block ?y) (clear ?y))

:effect (and (not (on ?b ?x)) (clear ?x)

(not (clear ?y)) (on ?b ?y)))

(:action move-to-table

:parameters (?b ?x)

:precondition (and (block ?b) (on ?b ?x) (clear ?b))

:effect (and (not (on ?b ?x)) (clear ?x) (on ?b table)))

)

Ως κατηγορήματα (predicates) έχουμε το (on ?x ?y) με το οποίο ορίζουμε ότι ο κύβος x είναι πάνω στο y, είτε το y είναι ένας άλλος κύβος είτε είναι τραπέζι. Έχουμε ακόμη το (clear ?x) με το οποίο ορίζουμε ότι δεν υπάρχει άλλος κύβος πάνω στον κύβο x. Τέλος έχουμε και το (block ?x) με το οποίο καθορίζουμε ότι η μεταβλητή x είναι κύβος.

Αφού ορίσαμε τα κατηγορήματα, πρέπει να ορίσουμε και τις επιτρεπτές κινήσεις μαζί με τις προϋποθέσεις και τα αποτελέσματά τους. Η πρώτη κίνηση είναι η move(?b ?x ?y) η οποία μετακινεί τον κύβο b από το x στον κύβο y. Για να εκτελεστεί αυτή η πράξη πρέπει να ισχύει ότι οι b και y είναι κύβοι ((block ?b), (block ?y)) καθώς επίσης ότι και οι δύο αυτοί κύβοι δεν έχουν τίποτα από πάνω τους ((clear ?b), (clear ?y)). Τέλος, πρέπει ο κύβος b να είναι πάνω στο x ((on ?b ?x)). Εδώ παρατηρούμε ότι δεν ορίζεται τι πρέπει να είναι το x, καθώς μπορεί να είναι είτε κύβος, είτε τραπέζι. Τα αποτελέσματα αυτής της κίνησης είναι ότι ο κύβος b δεν είναι πλέον πάνω στο x (not (on ?b ?x)) και άρα το x δεν έχει τίποτα επάνω του ((clear ?x)). Επιπρόσθετα, ο κύβος b είναι πάνω στον κύβο y (on ?b ?y) και άρα ο y δεν είναι «καθαρός» (not (clear ?y)).

Τέλος, για να ολοκληρώσουμε την περιγραφή του προβλήματος, χρειάζεται να ορίσουμε την αρχική και την τελική κατάσταση. Η αρχική κατάσταση ορίζεται μέσα στο μπλοκ :init και η τελική στο μπλοκ :goal.

```
(define (problem strips-bw-1)
  (:domain strips-blocksworld)
  (:objects a b c table)
  (:init
    (on b table) (on a table) (on c a)
    (clear b) (clear c) (clear table)
    (block a) (block b) (block c)
  )
  (:goal
    (and (on a b) (on b c) (on c table))
  )
)
```

Εδώ παρατηρούμε ότι στην τελική κατάσταση ορίζουμε μόνο τη διάταξη των κύβων που επιθυμούμε, ενώ στην αρχική κατάσταση πρέπει να ορίσουμε και τα κατηγορήματα τα οποία ισχύουν.

Ο επιλυτής LAMA για το πιο πάνω πρόβλημα δίνει την πιο κάτω λύση (που είναι και η βέλτιστη):

(move-to-table c a)

(move b table c)

(move a table b)

## Κεφάλαιο 3

### Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών

---

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Εισαγωγή                                                 | 15 |
| 3.2 Είδη περιορισμών                                         | 16 |
| 3.3 Επίλυση Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών             | 16 |
| 3.3.1 Αναγωγή προβλημάτων                                    | 16 |
| 3.3.2 Αναζήτηση                                              | 17 |
| 3.3.3 Σύνθεση λύσεων                                         | 17 |
| 3.4 Παραδείγματα Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών        | 17 |
| 3.4.1 Πρόβλημα Χρωματισμού Χάρτη                             | 18 |
| 3.4.2 Πρόβλημα N-βασίλισσών                                  | 19 |
| 3.5 Διάδοση Περιορισμών και περιορισμός του χώρου αναζήτησης | 20 |
| 3.5.1 Συνέπεια κόμβου                                        | 21 |
| 3.5.2 Συνέπεια ακμής                                         | 22 |
| 3.5.3 Συνέπεια μονοπατιού                                    | 22 |
| 3.5.4 K – Συνέπεια                                           | 23 |
| 3.6 Βασικοί αλγόριθμοι συνέπειας ακμής                       | 23 |
| 3.6.1 Ο αλγόριθμος AC3                                       | 23 |
| 3.6.2 Ο αλγόριθμος AC2001                                    | 24 |
| 3.6.3 Ο αλγόριθμος AC3rm                                     | 25 |
| 3.6.4 Ο αλγόριθμος AC3bit+rm                                 | 27 |
| 3.6.5 Ο αλγόριθμος Forward Checking (FC)                     | 27 |
| 3.7 Άλλες τεχνικές βελτίωσης του χρόνου επίλυσης ενός ΠΠΠ    | 28 |
| 3.7.1 Στρατηγικές αναζήτησης                                 | 28 |
| 3.7.1.1 Η στρατηγική αναζήτησης intVarSearch                 | 29 |
| 3.7.1.2 Η στρατηγική αναζήτησης activityBasedSearch          | 29 |
| 3.7.2 Στρατηγικές επανεκκίνησης                              | 29 |
| 3.7.2.1 Η στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart       | 30 |
| 3.7.2.2 Η στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart              | 30 |

---

### 3.1 Εισαγωγή

Η ικανοποίηση περιορισμών είναι ένα γενικό και ισχυρό παράδειγμα επίλυσης προβλημάτων, το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ σύνολο τομέων, που κυμαίνονται από το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό μέχρι την υπολογιστική όραση, αναγνώριση προτύπων, σχεδιασμό με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), μοντελοποίηση και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων [6].

Σύμφωνα με τους Russell & Norvig (2009), ένα πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών αποτελείται από:

- α) ένα σύνολο μεταβλητών  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$
- β) ένα σύνολο από πεδία ορισμού  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ , όπου  $D_1$  είναι το πεδίο ορισμού της μεταβλητής  $X_1$ ,  $D_2$  το πεδίο ορισμού της  $X_2$  κ.ο.κ.
- γ) Ένα σύνολο περιορισμών  $C$ , οι οποίοι καθορίζουν επιτρεπτούς συνδυασμούς τιμών ανάμεσα στις μεταβλητές.

Με πιο απλά λόγια, δεδομένου ενός συνόλου μεταβλητών ( $X$ ) με τα αντίστοιχα πεδία ορισμών τους ( $D$ ) και ένα σύνολο περιορισμών ( $C$ ) πάνω στις επιτρεπτές τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές, το πρόβλημα (Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών) είναι να βρούμε μία τιμή για κάθε μεταβλητή από το πεδίο ορισμού της έτσι ώστε οι τιμές αυτές να ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς [6, 18].

Μία κατάσταση (state) του προβλήματος, ορίζεται ως μια ανάθεση τιμών σε κάποιες ή όλες από τις μεταβλητές  $\{X_i = v_i; X_j = v_j, \dots\}$ . Όταν μία ανάθεση τιμών δεν παραβιάζει κανέναν από τους περιορισμούς, τότε ονομάζεται συνεπής ανάθεση (consistent). Πλήρης ανάθεση ονομάζεται η ανάθεση τιμών σε όλες τις μεταβλητές του συνόλου  $X$ , ενώ μερική ανάθεση είναι αυτή η οποία αναθέτει τιμές μόνο σε ορισμένες από τις μεταβλητές του συνόλου [18]. Συνεπώς, λύση ενός Προβλήματος Ικανοποίησης Περιορισμών είναι μια πλήρης και συνεπής ανάθεση. Η δυνατότητα όμως της μερικής και συνεπής ανάθεσης θα μας φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη στη συνέχεια της εργασίας.

### 3.2 Είδη περιορισμών

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι περιορισμών, ανάλογα με τον αριθμό των μεταβλητών τους οποίους περιλαμβάνουν. Έτσι, ένας περιορισμός ο οποίος αφορά μόνο μία μεταβλητή ονομάζεται μοναδιαίος – unary (π.χ.  $X > 7$ ). Ένας περιορισμός ο οποίος περιλαμβάνει δύο μεταβλητές ονομάζεται δυαδικός – binary (π.χ.  $X > Y$ ). Τέλος ένας περιορισμός ο οποίος περιλαμβάνει περισσότερες από δύο μεταβλητές ονομάζεται ανώτερης τάξης – higher order (π.χ.  $X+Y+Z > 0$ ) [18].

### 3.3 Επίλυση Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών

Οι βασικές τεχνικές για επίλυση Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών είναι οι ακόλουθες:

- α) Αναγωγή προβλημάτων (problem reduction)
- β) Αναζήτηση (search)
- γ) Σύνθεση λύσεων (solution synthesis)

Ακολουθεί μια μικρή περιγραφή της κάθε τεχνικής.

#### 3.3.1 Αναγωγή προβλημάτων

Η βασική ιδέα της Αναγωγής Προβλημάτων είναι, όπως προϋδεάζει και η ονομασία, η αναγωγή του προβλήματος σε κάποιο ευκολότερο αλλά ταυτόχρονα και ισοδύναμο (έχει δηλαδή το ίδιο ακριβώς σύνολο μεταβλητών και το ίδιο ακριβώς σύνολο λύσεων) πρόβλημα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με αφαίρεση περιττών τιμών από τα πεδία των μεταβλητών, είτε με σύσφιξη των περιορισμών με αφαίρεση περιττών labels, όπου label είναι η ταυτόχρονη ανάθεση τιμών σε ένα σύνολο μεταβλητών. Ως περιττές τιμές (αντίστοιχα και περιττά labels), ορίζονται οι τιμές εκείνες (αντίστοιχα και τα label εκείνα) οι οποίες δεν εμφανίζονται σε καμία λύση του προβλήματος. Έτσι το νέο πρόβλημα μπορεί, αλλά όχι απαραίτητα, να είναι ευκολότερο, καθώς οι μεταβλητές έχουν λιγότερες δυνατές τιμές και υπάρχουν λιγότερα labels τα οποία πρέπει να εξεταστούν.



Όπως και οι Ghallab, Nau & Traverso (2004) αναφέρουν, «η αφαίρεση μιας τιμής από το πεδίο ορισμού ή μιας πλειάδας από έναν περιορισμό αντιστοιχεί στη σύσφιξη του ΠΠΠ εκτός και αν αυτή η τιμή ή πλειάδα είναι περιττή. Η αφαίρεση μιας περιττής τιμής από ένα πεδίο ορισμού ή μιας περιττής πλειάδας από ένα περιορισμό δίνει ένα ισοδύναμο ΠΠΠ καθώς δεν αλλάζει το σύνολο λύσεων. Σημειώστε ότι αν όλες οι τιμές σε ένα πεδίο ορισμού ή όλες οι πλειάδες σε ένα περιορισμό είναι περιττές, τότε το αντίστοιχο ΠΠΠ είναι ασυνεπές» [6].

### **3.3.2 Αναζήτηση**

Η βασική ιδέα της αναζήτησης, είναι η αναζήτηση μιας λύσης, μέσω της ανάθεσης τιμών στις μεταβλητές. Ο πιο γνωστός και βασικός αλγόριθμος αναζήτησης, είναι αυτός της οπισθοδρόμησης (backtracking). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, επιλέγεται μία μεταβλητή και ανατίθεται σε αυτή μία μεταβλητή από το πεδίο ορισμού της. Αν σε κάποια ανάθεση τιμής, παραβιάζεται κάποιος περιορισμός, τότε η τιμή αυτή αφαιρείται από το πεδίο ορισμού της μεταβλητής και ο αλγόριθμος οπισθοδρομεί στο σημείο όπου έγινε η ανάθεση της τιμής αυτής και επιλέγει μία άλλη τιμή από το πεδίο ορισμού της μεταβλητής. Η επιλογή της μεταβλητής καθώς και η επιλογή της τιμής που θα ανατεθεί στη μεταβλητή μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το χρόνο αναζήτησης.

### **3.3.3 Σύνθεση λύσεων**

Οι τεχνικές σύνθεσης λύσεων παράγουν επιτρεπτά σύνθετα labels αντί να αφαιρούν περιττά labels. Προσομοιάζει με μια ειδική περίπτωση αναγωγής προβλήματος  $n$  μεταβλητών όπου ο  $n$ -ιστός περιορισμός φτιάχνεται και όλα τα  $n$ -σύνθετα labels που παραβιάζουν κάποιο περιορισμό αφαιρούνται. Εναλλακτικά, μπορεί να παρομοιαστεί με μία παράλληλη αναζήτηση πολλαπλών σύνθετων labels [19].

## **3.4 Παραδείγματα Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών**

Δύο από τα πιο διαδεδομένα παραδείγματα Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών είναι το πρόβλημα του χρωματισμού χάρτη και το πρόβλημα των  $N$  βασιλισσών, τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια.

### 3.4.1 Πρόβλημα Χρωματισμού Χάρτη

Το πρόβλημα αυτό έχει ως στόχο να χρωματιστούν οι διάφορες περιοχές ενός χάρτη (στο συγκεκριμένο παράδειγμα της Αυστραλίας) με ένα πεπερασμένο αριθμό χρωμάτων (ο οποίος πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό των περιοχών που έχουμε να χρωματίσουμε), με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε δύο γειτονικές περιοχές να μην έχουν το ίδιο χρώμα.



Εικόνα 3.1 – Πρόβλημα χρωματισμού χάρτη

Για να διατυπώσουμε το πρόβλημα αυτό σαν ένα πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών, πρέπει να ορίσουμε το σύνολο των μεταβλητών  $X$ , το σύνολο των πεδίων ορισμού  $D$ , καθώς και το σύνολο των περιορισμών  $C$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι μεταβλητές μας είναι οι διάφορες περιοχές του χάρτη της Αυστραλίας. Επομένως  $X = \{WA, NT, Q, NSW, V, SA, T\}$ .

Το πεδίο ορισμού της κάθε μεταβλητής είναι το σύνολο των διαθέσιμων χρωμάτων. Έστω ότι τα διαθέσιμα χρώματα είναι το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε. Επομένως τα πεδία ορισμού είναι

$$D_i = \{\text{κόκκινο, πράσινο, μπλε}\} \quad \forall i \in X$$

Ο μόνος περιορισμός που έχουμε στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ότι δύο γειτονικές περιοχές δεν μπορούν να έχουν το ίδιο χρώμα. Επομένως, το σύνολο των περιορισμών  $C$  είναι

$$C = \{SA \neq WA, SA \neq NT, SA \neq Q, SA \neq NSW, SA \neq V, WA \neq NT, NT \neq Q, Q \neq NSW, NSW \neq V\}$$

Το πιο πάνω πρόβλημα (όπως και αρκετά άλλα Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών) έχει πολλές πιθανές λύσεις. Μια από αυτές είναι:

$\{WA = \text{κόκκινο}, NT = \text{πράσινο}, Q = \text{κόκκινο}, NSW = \text{πράσινο}, V = \text{κόκκινο}, SA = \text{μπλε}, T = \text{κόκκινο}\}.$

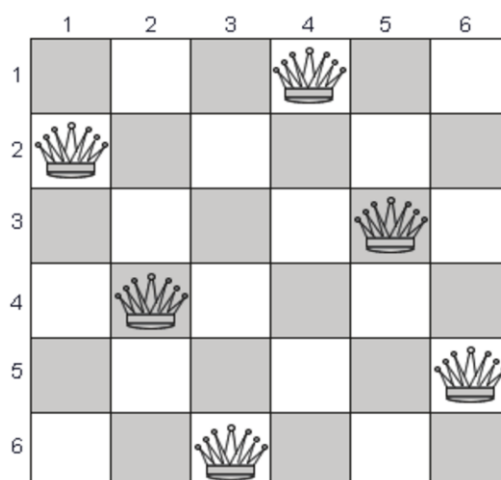
### 3.4.2 Πρόβλημα N-βασιλισσών

Σε αυτό το πρόβλημα έχουμε μία σκακιέρα διαστάσεων  $N \times N$  πάνω στην οποία καλούμαστε να τοποθετήσουμε  $N$  βασίλισσες με τρόπο που καμία βασίλισσα να μην απειλείται από κάποια άλλη· να μην βρίσκεται δηλαδή στην ίδια γραμμή, στήλη ή διαγώνιο με κάποια άλλη βασίλισσα.

Σε αυτό το πρόβλημα, οι μεταβλητές είναι οι στήλες της σκακιέρας, αφού σε κάθε στήλη μπορεί να τοποθετηθεί μόνο μία βασίλισσα, και το πεδίο ορισμού της κάθε μεταβλητής είναι οι γραμμές της σκακιέρας. Επομένως

$$X = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\}$$

$$\text{και } D_i = \{1, 2, \dots, N\} \quad \forall i \in X$$



Εικόνα 3.2 – Πρόβλημα 6 βασιλισσών

Έτσι, η ανάθεση  $Q_2 = 5$ , σημαίνει ότι η βασίλισσα της δεύτερης στήλης είναι τοποθετημένη στην πέμπτη γραμμή. Η αναπαράσταση αυτή, χωρίς οποιονδήποτε άλλο περιορισμό, αποκλείει δύο βασίλισσες να βρίσκονται στην ίδια στήλη. Επομένως, πρέπει να προσθέσουμε τους περιορισμούς για να μην έχουμε δύο βασίλισσες στην ίδια γραμμή ή στην ίδια διαγώνιο.

Ο περιορισμός ο οποίος αποκλείει δύο βασίλισσες στην ίδια γραμμή είναι:

$$Q_i \neq Q_j \quad \forall i, j = 1 \dots N \text{ και } i < j$$

Ενώ ο περιορισμός ο οποίος αποκλείει δύο βασίλισσες στην ίδια διαγώνιο:

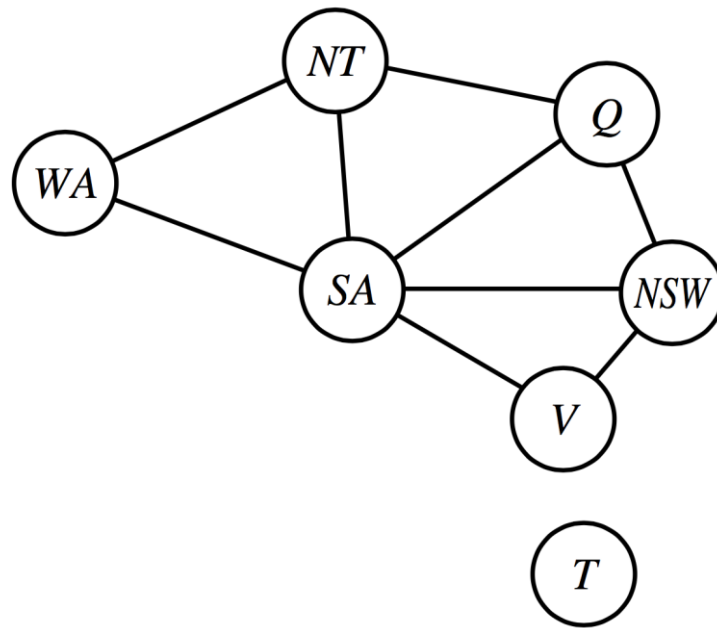
$$Q_i + i \neq Q_j + j \text{ και } Q_i - i \neq Q_j - j \quad \forall i, j = 1 \dots N \text{ και } i < j$$

### 3.5 Διάδοση Περιορισμών και περιορισμός του χώρου αναζήτησης

Για να λύσουμε ένα πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών, πρέπει να αναζητήσουμε τη λύση στο χώρο αναζήτησης. Ο αλγόριθμος οπισθοδρόμησης ψάχνει στο χώρο όλων των labels. Όπως αναφέρουν οι Russell & Norvig (2009), «η βασική ιδέα είναι να αποκόψουμε μεγάλα τμήματα του χώρου αναζήτησης ταυτόχρονα με τον εντοπισμό συνδυασμών μεταβλητής/τιμής οι οποίοι παραβιάζουν τους περιορισμούς»[18].

Επομένως, η μεγαλύτερη πρόκληση σε αυτού του είδους τα προβλήματα, είναι να ανακαλύψουμε γρήγορα τα τμήματα του χώρου αναζήτησης, τα οποία μπορούν να αποκοπούν. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες προσπαθούν να εντοπίσουν ασυνεπή labels και να τα αφαιρέσουν από το χώρο αναζήτησης. Οι μέθοδοι αυτοί ονομάζονται Μέθοδοι Διάδοσης Περιορισμών (constraint propagations).

Σε ένα πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών μπορούμε να κατασκευάσουμε το γράφο περιορισμών (constraint graph), στον οποίο η κάθε μεταβλητή θεωρείται ένας κόμβος, και δύο κόμβοι ενώνονται μεταξύ τους με μια ακμή, εφόσον οι δύο αυτοί κόμβοι εμφανίζονται μαζί σε κάποιο περιορισμό. Στην εικόνα 3.3 φαίνεται ο γράφος περιορισμών για το πρόβλημα του χρωματισμού χάρτη.



Εικόνα 3.3 – Γράφος περιορισμών για το πρόβλημα του χρωματισμού χάρτη

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τις βασικές μεθόδους διάδοσης περιορισμών.

### 3.5.1 Συνέπεια κόμβου

Μία μεταβλητή έχει συνέπεια κόμβου αν και μόνο αν όλες οι τιμές στο πεδίο ορισμού της ικανοποιούν όλους τους μοναδιαίους περιορισμούς που αφορούν τη συγκεκριμένη μεταβλητή. Ας δούμε ένα παράδειγμα.

Έστω το σύνολο μεταβλητών  $X = \{A, B, C\}$  με πεδία ορισμού

$$D_A = D_B = D_C = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$$

και το σύνολο περιορισμών  $C = \{A < 10, A + B < 15, B < 7, C + A > 9\}$

Παρατηρούμε ότι η μεταβλητή  $B$  δεν έχει συνέπεια κόμβου, καθώς οι τιμές 7 και 8 από το πεδίο ορισμού της, παραβιάζουν τον περιορισμό  $B < 7$ . Επομένως, για να κάνουμε τη μεταβλητή  $B$  συνεπής, πρέπει να αφαιρέσουμε τις τιμές 7 και 8 από το πεδίο ορισμού της. Άρα, τα νέα πεδία ορισμού είναι  $D_A = D_C = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$  και  $D_B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .

### 3.5.2 Συνέπεια ακμής

Μια μεταβλητή έχει συνέπεια ακμής, αν και μόνο αν κάθε τιμή στο πεδίο ορισμού της, ικανοποιεί όλους τους δυαδικούς περιορισμούς στους οποίους εμφανίζεται η μεταβλητή αυτή.

Έστω το πρόβλημα που περιγράψαμε πιο πάνω. Μετά τη συνέπεια κόμβου, τα πεδία ορισμού των μεταβλητών είναι  $D_A = D_C = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$  και  $D_B = \{1,2,3,4,5,6\}$ . Θα ελέγξουμε πρώτα τη μεταβλητή  $A$  για συνέπεια ακμής. Οι δυαδικοί περιορισμοί στους οποίους εμφανίζεται η μεταβλητή  $A$  είναι  $A + B < 15$  και  $C + A > 9$ . Παρατηρούμε ότι για  $A = 1$  ο περιορισμός  $C + A > 9$  δεν ικανοποιείται. Επομένως αφαιρούμε την τιμή αυτή από το πεδίο ορισμού της  $A$  και γίνεται  $D_A = \{2,3,4,5,6,7,8\}$ . Αφού αφαιρέσουμε μια τιμή πρέπει και πάλι να ελέγξουμε κατά πόσον επηρεάστηκαν άλλοι δυαδικοί περιορισμοί που περιλαμβάνουν τη μεταβλητή (στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο περιορισμός  $A + B < 15$  δεν επηρεάζεται).

Ελέγχοντας στη συνέχεια τις μεταβλητές  $B$  και  $C$  προκύπτει ότι η τιμή  $C = 1$  δεν ικανοποιεί ούτε αυτή τον περιορισμό  $C + A > 9$  και έτσι το πεδίο ορισμού της γίνεται  $D_C = \{2,3,4,5,6,7,8\}$  και το πρόβλημα έχει πλέον συνέπεια ακμής.

### 3.5.3 Συνέπεια μονοπατιού

Ένα σύνολο δύο μεταβλητών  $\{X_i, X_j\}$  έχει συνέπεια μονοπατιού σε συνάρτηση με μία τρίτη μεταβλητή  $X_m$ , αν για κάθε ανάθεση  $\{X_i = a, X_j = b\}$  η οποία είναι συνεπής με τους περιορισμούς που αφορούν τις μεταβλητές  $\{X_i, X_j\}$ , υπάρχει μία ανάθεση για τη μεταβλητή  $X_m$  η οποία είναι συνεπής τόσο με τους περιορισμούς που αφορούν τις μεταβλητές  $\{X_i, X_m\}$  όσο και με τους περιορισμούς που αφορούν τις μεταβλητές  $\{X_m, X_j\}$ .

### 3.5.4 K - Συνέπεια

Ένα πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών είναι K–συνεπές αν για κάθε σύνολο  $K - 1$  μεταβλητών και για κάθε συνεπής ανάθεση σε αυτές τις μεταβλητές, υπάρχει μια συνεπής τιμή για την K-ιοστή μεταβλητή.

Στην πράξη, οι περισσότεροι επιλυτές προβλημάτων ικανοποίησης περιορισμών χρησιμοποιούν αλγόριθμους οι οποίοι επιτυγχάνουν συνέπεια κόμβου και συνέπεια ακμής, καθώς τα άλλα δύο είδη συνέπειας είναι ακριβά να υλοποιηθούν υπολογιστικά [18].

### 3.6 Βασικοί αλγόριθμοι συνέπειας ακμής

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε 5 βασικούς αλγόριθμους οι οποίοι επιτυγχάνουν συνέπεια ακμής και είναι ευρέως διαδεδομένοι στους επιλυτές προβλημάτων ικανοποίησης περιορισμών (π.χ. Choco, Minion, GeCode κ.ά.).

#### 3.6.1 Ο αλγόριθμος AC3

Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάστηκε το 1977 από τον Alan K. Mackworth [11] με στόχο ένα Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών να έχει συνέπεια ακμής. Ο αλγόριθμος αυτός παίρνει ως είσοδο ένα δυαδικό Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών και σε μία λίστα τοποθετεί όλες τις ακμές, όπου ακμή μεταξύ δύο κόμβων – μεταβλητών υπάρχει μόνο αν οι δύο αυτές μεταβλητές συνδέονται με ένα περιορισμό. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι οι ακμές δεν είναι αμφίδρομες. Αν δηλαδή υπάρχει ένας περιορισμός ανάμεσα στις μεταβλητές  $X_i$  και  $X_j$ , τότε θα έχουμε την ακμή  $(X_i, X_j)$  αλλά και την ακμή  $(X_j, X_i)$ .

Στη συνέχεια, και ενόσω η λίστα δεν είναι άδεια, αφαιρεί μια ακμή από τη λίστα (έστω ανάμεσα στις μεταβλητές  $X_i$  και  $X_j$ ). Ακολούθως, ελέγχει αν για όλες τις τιμές στο πεδίο ορισμού της  $X_i$  υπάρχει τιμή στο πεδίο ορισμού της  $X_j$  η οποία να ικανοποιεί τους περιορισμούς ανάμεσα στις  $X_i$  και  $X_j$  και αφαιρεί τις τιμές εκείνες από το πεδίο ορισμού της  $X_i$  που δεν είναι συνεπές. Αν τώρα το πεδίο ορισμού της  $X_i$  αλλάξει, τότε

όλες οι ακμές  $(X_k, X_i)$  όπου  $k \neq j$ , προσθέτονται στη λίστα. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν όλες οι ακμές είναι συνεπής.

```

function AC-3(csp) returns false if an inconsistency is found and true otherwise
inputs: csp, a binary CSP with components  $(X, D, C)$ 
local variables: queue, a queue of arcs, initially all the arcs in csp

while queue is not empty do
   $(X_i, X_j) \leftarrow \text{REMOVE-FIRST}(\text{queue})$ 
  if REVISE(csp,  $X_i, X_j$ ) then
    if size of  $D_i = 0$  then return false
    for each  $X_k$  in  $X_i.\text{NEIGHBORS} - \{X_j\}$  do
      add  $(X_k, X_i)$  to queue
return true



---


function REVISE(csp,  $X_i, X_j$ ) returns true iff we revise the domain of  $X_i$ 
  revised  $\leftarrow$  false
  for each  $x$  in  $D_i$  do
    if no value  $y$  in  $D_j$  allows  $(x,y)$  to satisfy the constraint between  $X_i$  and  $X_j$  then
      delete  $x$  from  $D_i$ 
      revised  $\leftarrow$  true
  return revised

```

Εικόνα 3.4 – Ο αλγόριθμος AC3

### 3.6.2 Ο αλγόριθμος AC2001

Ο αλγόριθμος αυτός πρωτοπαρουσιάστηκε το 2005 από τους Christian Bessiere, J. C. Régin, Roland Yap, και Yuanling Zhang και είναι μια παραλλαγή του αλγόριθμου AC3. Συγκεκριμένα, στον αλγόριθμο AC3, όπως τον περιγράψαμε πιο πάνω, έπρεπε κάθε φορά που ελέγχαμε μία ακμή  $(X_i, X_j)$  να ψάχνουμε όλο το πεδίο ορισμού της  $X_j$  για να δούμε αν υπάρχει τιμή  $y$  η οποία να υποστηρίζει την τιμή  $x$  του πεδίου ορισμού της  $X_i$ . Η λογική πίσω από τον αλγόριθμο AC2001 είναι για κάθε  $x$  στο πεδίο ορισμού της  $X_i$  να κρατάμε σε μια δομή την τιμή εκείνη του  $y$  στο πεδίο ορισμού της  $X_j$  η οποία είναι στήριξη τιμής  $x$  στην ακμή  $(X_i, X_j)$ , έτσι ώστε κάθε φορά που ελέγχουμε τη συγκεκριμένη ακμή, να ελέγχουμε μόνο κατά πόσον η τιμή  $y$  υπάρχει ακόμα στο πεδίο ορισμού της  $X_j$ . Αν δεν υπάρχει, χρειάζεται να ελέγξουμε μόνο τις τιμές εκείνες του πεδίου ορισμού της  $X_j$  οι οποίες είναι μεγαλύτερες του  $y$  αφού οι μικρότερες τιμές ελέγχθηκαν ήδη δεδομένου ότι οι τιμές αυτές είναι ταξινομημένες σε αύξουσα σειρά [2].



Παρατηρούμε ότι η διαφοροποίηση με τον αλγόριθμο AC3 έγκειται στη συνάρτηση REVISE. Η καινούρια συνάρτηση για αυτό τον αλγόριθμο φαίνεται στην εικόνα 3.5 πιο κάτω.

---

```

procedure REVISE2001/3.1( $x_i, x_j$ )
  begin
    DELETE  $\leftarrow$  false
    for each  $a \in D_i$  do
       $b \leftarrow \text{Last}((x_i, a), x_j)$ 
1.      if  $b \notin D_j$  then
         $b \leftarrow \text{succ}(b, D_j)$ 
2.      while ( $b \neq \text{NIL}$ ) and ( $\neg c_{ij}(a, b)$ ) do
         $b \leftarrow \text{succ}(b, D_j)$ 
        if  $b \neq \text{NIL}$  then
           $\text{Last}((x_i, a), x_j) \leftarrow b$ 
        else
          delete  $a$  from  $D_i$ 
          DELETE  $\leftarrow$  true
    return DELETE
  end

```

---

Εικόνα 3.5 – Συνάρτηση REVISE για τον αλγόριθμο AC2001

Η δομή  $\text{Last}((X_i, a), X_j)$ , έχει αποθηκευμένη την τιμή του πεδίου ορισμού της  $X_j$  η οποία, κατά την τελευταία εκτέλεση της συνέπειας ακμής, είναι υποστήριξη της τιμής  $a$  του πεδίου ορισμού  $X_i$  για την ακμή  $(X_i, X_j)$ .

Η συνάρτηση  $\text{succ}(a, D_j)$ , όπου  $D_j$  το τρέχων πεδίων ορισμού της  $X_j$  κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επιβολής της Συνέπειας Ακμής, επιστρέφει την πρώτη τιμή του  $D_j$  που είναι μετά το  $a$  ή NIL αν δεν υπάρχει.

### 3.6.3 Ο αλγόριθμος AC3rm

Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάστηκε το 2007 από τους Christophe Lecoutre και Fred Hemery και είναι και αυτός μια παραλλαγή του αλγόριθμου AC3 πιο πάνω.

Προτού εξηγήσουμε αυτή την παραλλαγή, ορίζουμε μια πλειάδα (tuple)  $t$  ως ενίσχυση (support) της τιμής  $a$  για τη μεταβλητή  $X_i$  αν η πλειάδα αυτή είναι συνεπής με το σύνολο των περιορισμών  $C$  και στην πλειάδα αυτή η τιμή της μεταβλητής  $X_i$  ισούται με

$\alpha$  ( $t[X_i] = \alpha$ ). Η πληροφορία αυτή αποθηκεύεται σε μία δομή  $\text{supp}[C, X_i, \alpha]$ . Στη δομή αυτή αποθηκεύεται η λεξικογραφικά μικρότερη πλειάδα από όλες τις πλειάδες που αποτελούν ενίσχυση της  $\alpha$  για τη μεταβλητή  $X_i$ .

Σε αυτή την παραλλαγή, στη συνάρτηση *Revise*, ελέγχουμε αρχικά κατά πόσο η πλειάδα αυτή είναι έγκυρη. Αν όχι, τότε μέσω της συνάρτησης *seekSupport* ψάχνουμε μια άλλη πλειάδα η οποία να είναι ενίσχυση της τιμής  $\alpha$  για τη μεταβλητή  $X$ . Αν δεν βρεθεί μια τέτοια πλειάδα, δηλαδή η συνάρτηση *seekSupport* επιστρέφει  $\top$ , τότε η τιμή  $\alpha$  αφαιρείται από το πεδίο ορισμού της  $X$ , διαφορετικά η πλειάδα η οποία επιστρέφεται από την *seekSupport*, θα είναι ενίσχυση για όλες τις μεταβλητές  $Y$  που συνδέονται με τη  $X$  (γραμμή 6 του αλγόριθμου 2).

Η συνάρτηση *seekSupport* ελέγχει κατά πόσον υπάρχει άλλη πλειάδα η οποία να είναι λεξικογραφικά μεγαλύτερη από την πλειάδα που είναι αποθηκευμένη στη δομή *supp* και αποτελεί ενίσχυση της τιμής  $\alpha$  για τη μεταβλητή  $X$  [8].

---

**Algorithm 1** *doAC* ( $P = (\mathcal{X}, \mathcal{C}) : \text{CN}$ ): Boolean

---

```

1:  $Q \leftarrow \{(C, X) \mid C \in \mathcal{C} \wedge X \in \text{scp}(C)\}$ 
2: while  $Q \neq \emptyset$  do
3:   pick and delete  $(C, X)$  from  $Q$ 
4:   if revise( $C, X$ ) then
5:     if  $\text{dom}(X) = \emptyset$  then return false
6:      $Q \leftarrow Q \cup \{(C', Y) \mid C' \neq C, Y \neq X, \{X, Y\} \subseteq \text{scp}(C')\}$ 
7: return true

```

---

**Algorithm 2** *revise*( $C : \text{Constraint}, X : \text{Variable}$ ): Boolean

---

```

1:  $\text{nbElements} \leftarrow |\text{dom}(X)|$ 
2: for each  $a \in \text{dom}(X)$  do
3:   if  $\text{supp}[C, X, a]$  is valid then continue
4:    $t \leftarrow \text{seekSupport}(C, X, a)$ 
5:   if  $t = \top$  then remove  $a$  from  $\text{dom}(X)$ 
6:   else for each  $Y \in \text{scp}(C)$  do  $\text{supp}[C, Y, t[Y]] \leftarrow t$ 
7: return  $\text{nbElements} \neq |\text{dom}(X)|$ 

```

---

**Algorithm 3** *seekSupport*( $C, X, a$ ): Tuple

---

```

1:  $t \leftarrow \perp$ 
2: while  $t \neq \top$  do
3:   if  $C(t)$  then return  $t$ 
4:    $t \leftarrow \text{setNextTuple}(C, X, a, t)$ 
5: return  $\top$ 

```

---

Εικόνα 3.6 – Ο Αλγόριθμος AC3rm

### 3.6.4 Ο αλγόριθμος AC3bit+rm

Ο αλγόριθμος αυτός είναι μια επέκταση του AC3rm, στον οποίο η τρέχουσα κατάσταση του πεδίου ορισμού μιας μεταβλητής αναπαρίσταται δυαδικά. Υπάρχει δηλαδή ένα δυαδικό διάνυσμα μήκους όσο και το αρχικό μέγεθος του πεδίου ορισμού, το οποίο υποδηλώνει κατά πόσο μια τιμή στο πεδίο ορισμού είναι παρών ή όχι κατά την τρέχουσα χρονική στιγμή. Έστω για παράδειγμα η μεταβλητή  $X$  με πεδίο ορισμού  $D_x = \{1, 2, 3, 4\}$  και την παρούσα χρονική στιγμή το δυαδικό διάνυσμα το οποίο αναπαριστά τις διαθέσιμες τιμές είναι το  $(0, 1, 0, 1)$ . Αυτό συνεπάγεται ότι οι τιμές 1 και 3 έχουν αφαιρεθεί από το πεδίο ορισμού της  $X$  καθώς ήταν ασυνεπείς.

Όμοια, όλοι οι περιορισμοί μπορούν να αναπαρασταθούν με τη δυαδική αναπαράσταση όλων των επιτρεπτών και απαγορευμένων τιμών της κάθε τριάδας  $(C, X, a)$ , όπου  $a$  μια τιμή η οποία ανήκει στο πεδίο ορισμού της  $X$  και  $C$  ένας περιορισμός που περιλαμβάνει τη  $X$ . Η λογική πίσω από αυτή την αναπαράσταση είναι ότι οι δυαδικές πράξεις (bitwise operations) είναι πολύ πιο γρήγορες υπολογιστικά [9].

### 3.6.5 Ο αλγόριθμος Forward Checking (FC)

Ο αλγόριθμος αυτός, ο οποίος χρονολογείται από το 1980, είναι σχετικά απλός. Αρχικά επιλέγεται μία μεταβλητή (έστω  $X$ ) και ανατίθεται σε αυτή μία τιμή από το πεδίο ορισμού της (έστω  $X = a$ ). Στη συνέχεια, για κάθε μεταβλητή  $Y$ , η οποία είναι συνδεδεμένη με τη  $X$  με κάποιο περιορισμό, διαγράφουμε από το πεδίο ορισμού της όλες τις τιμές οι οποίες δεν είναι συνεπείς με την ανάθεση  $X = a$ . Αν σε όλα τα πεδία ορισμού των μεταβλητών που είναι συνδεδεμένες με τη  $X$  παραμείνουν διαθέσιμες τιμές, τότε επιλέγεται μια άλλη μεταβλητή από το σύνολο των μεταβλητών και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Διαφορετικά, η τιμή  $a$  διαγράφεται από το πεδίο ορισμού της  $X$  και επιλέγεται η επόμενη τιμή (έστω  $X = \beta$ ) που πρέπει να ελεγχθεί [7].

Στην εικόνα 3.7 πιο κάτω φαίνεται ο ψευδοκώδικας για τον αλγόριθμο αυτό, όπου  $A$  μια μερική ανάθεση μεταβλητών-τιμών,  $U$  η λίστα με τις μεταβλητές στις οποίες δεν έχει ανατεθεί ακόμη τιμή και  $D$  τα πεδία τιμών των μεταβλητών, τη δεδομένη χρονική στιγμή.

```

BT+FC( $A, U, D$ )
if  $A$  is complete then
    return  $A$ 
end if
Remove a variable  $X$  from  $U$ 
for all values  $x \in D(X)$  do
    if  $X = x$  is consistent with  $A$  according to the constraints then
        Add  $X = x$  to  $A$ 
         $D' \leftarrow D$  (Save the current domains)
        for all  $Y \in U$  (i.e.,  $Y$  an unassigned variable),  $Y - - - X$  (i.e.,  $Y$  a neighbor of  $X$  in the
        constrained graph) do
            Remove values for  $Y$  from  $D'(Y)$  that are inconsistent with  $A$ 
        end for
        if for all  $Y \in U, Y - - - X$ , we have  $D'(Y)$  not empty then
             $result \leftarrow \text{BT+FC}(A, U, D')$ 
            if  $result \neq failure$  then
                return  $result$ 
            end if
        end if
        Remove  $X = x$  from  $A$ 
    end if
end for
return failure

```

Εικόνα 3.7 – Ο Αλγόριθμος FC

### 3.7 Άλλες τεχνικές βελτίωσης του χρόνου επίλυσης ενός Προβλήματος Ικανοποίησης Περιορισμών

Εκτός από τους αλγόριθμους οι οποίοι επιτυγχάνουν συνέπεια ακμής, που περιγράψαμε πιο πάνω, υπάρχουν και άλλες τεχνικές οι οποίες εφαρμόζονται για να βελτιώσουν το χρόνο επίλυσης ενός Προβλήματος Ικανοποίησης Περιορισμών. Τέτοιες τεχνικές είναι οι στρατηγικές αναζήτησης και οι στρατηγικές επανεκκίνησης.

#### 3.7.1 Στρατηγικές αναζήτησης

Η σειρά με την οποία επιλέγονται οι μεταβλητές στις οποίες θα δοθεί τιμή καθώς επίσης και η τιμή η οποία επιλέγεται για έλεγχο, μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του αλγόριθμου αναζήτησης λύσης, καθώς δημιουργούνται διαφορετικά δέντρα αναζήτησης. Οι στρατηγικές αναζήτησης έχουν ως στόχο να βρουν και να επιλέξουν πρώτα εκείνες τις μεταβλητές οι οποίες θα ελαττώσουν το χρόνο λύσης.

### 3.7.1.1 Η στρατηγική αναζήτησης intVarSearch

Η στρατηγική αυτή είναι ένα εφαρμόσιμη μόνο πάνω σε ακέραιες μεταβλητές (μπορούν να συμπεριληφθούν και οι δυαδικές μεταβλητές αφού είναι και αυτές ακέραιες μεταβλητές με πεδίο ορισμού το  $\{0,1\}$ ), η οποία για την επιλογή της επόμενης μεταβλητής που θα γίνει label, χρησιμοποιεί την ευρετική συνάρτηση DomOverWDeg.

Η ευρετική συνάρτηση DomOverWDeg εκμεταλλεύεται πληροφορίες σχετικά με προηγούμενες καταστάσεις της διαδικασίας αναζήτησης. Συγκεκριμένα, επιλέγονται για labeling οι μεταβλητές οι οποίες εμφανίζονται σε περιορισμούς οι οποίοι οδηγούν συχνά το πρόβλημα σε αδιέξοδο. Αυτό επιτυγχάνεται συνδέοντας τον κάθε περιορισμό με ένα βάρος. Κάθε φορά που ο σχετικός περιορισμός παραβιάζεται κατά την αναζήτηση, το βάρος αυτό αυξάνεται [3].

### 3.7.1.2 Η στρατηγική αναζήτησης activityBasedSearch

Η στρατηγική αυτή είναι μια ευρετική συνάρτηση, η οποία «μετρά» τη δραστηριότητα της κάθε μεταβλητής (πόσο συχνά μειώνεται το πεδίο ορισμού της) κατά τη διάρκεια της διάδοσης των περιορισμών (propagation) και επιλέγει ως την επόμενη μεταβλητή που θα γίνει label τη μεταβλητή με τη μεγαλύτερη δραστηριότητα ανά μέγεθος πεδίου ορισμού. Επιλέγει δηλαδή τη μεταβλητή με τη μεγαλύτερη αναλογία  $\frac{A(x)}{|D(x)|}$ , όπου  $A(x)$  η δραστηριότητα της μεταβλητής  $x$  και  $|D(x)|$  το μέγεθος του πεδίου ορισμού της [12].

### 3.7.2 Στρατηγικές επανεκκίνησης

Η επανεκκίνηση ενός προβλήματος είναι κάτι το συνηθισμένο στην Τεχνητή Νοημοσύνη γενικότερα και στα Προβλήματα Ικανοποίησης περιορισμών ειδικότερα. Η λογική είναι ότι αν ένα μονοπάτι κάτω στο δέντρο αναζήτησης, παρόλο που δεν έχει φτάσει σε αδιέξοδο ακόμη, δεν παρουσιάζει σημαντική πρόοδο, είναι πολύ πιθανό να μας οδηγήσει σε αδιέξοδο. Επομένως, είναι καλύτερα να ξεκινήσουμε την αναζήτηση από την αρχή ακολουθώντας ένα διαφορετικό μονοπάτι. Οι επιλογές που έγιναν πριν την επανεκκίνηση βοηθούν στο «κλάδεμα» του δέντρου αναζήτησης. Η επανεκκίνηση ενός προβλήματος δεν εγγυάται ότι η λύση θα βρεθεί γρηγορότερα, ούτε ότι το

μονοπάτι το οποίο αποκόπηκε οδηγούσε σίγουρα σε αδιέξοδο. Εμπειρικές μελέτες όμως έδειξαν ότι πρακτικά είναι μια καλή τακτική για επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων [18].

### **3.7.2.1 Η στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart**

Μια στρατηγική επανεκκίνησης είναι η γεωμετρική επανεκκίνηση (Geometrical Restart). Σε αυτή τη στρατηγική, ορίζουμε τη βάση της επανεκκίνησης, το γεωμετρικό παράγοντα και το τελικό όριο της επανεκκίνησης. Ως βάση της επανεκκίνησης ορίζουμε τον αριθμό των αποτυχημένων αναθέσεων τιμών που πρέπει να κάνει ο επιλυτής προτού επανεκκινήσουμε το πρόβλημα. Ως γεωμετρικό παράγοντα ορίζουμε τον αριθμό εκείνο με τον οποίο θα πολλαπλασιάζουμε τη βάση της επανεκκίνησης για να προκύψει η νέα βάση. Και ως τελικό όριο ορίζουμε τον μέγιστο αριθμό επανεκκινήσεων. Έτσι, όταν οι αποτυχημένες αναθέσεις τιμών φτάσουν τον αριθμό της βάσης, το πρόβλημα επανεκκινά και η βάση σε αυτή την επανεκκίνηση είναι το γινόμενο της προηγούμενης βάσης επί το γεωμετρικό παράγοντα. Το σκηνικό αυτό επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το πρόβλημα επανεκκινήσει τόσες φορές όσες και το τελικό όριο της επανεκκίνησης.

### **3.7.2.2 Η στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart**

Μια άλλη στρατηγική επανεκκίνησης, πέραν της γεωμετρικής επανεκκίνησης, είναι η επανεκκίνηση τύπου Luby. Η στρατηγική αυτή, παίρνει τις ίδιες παραμέτρους με τη γεωμετρική επανεκκίνηση (βάση-base, γεωμετρικός παράγοντας-grow, τελικό όριο-limit), αλλά αντί ο αριθμός αποτυχημένων αναθέσεων που επιτρέπονται σε κάθε επανεκκίνηση να δίνεται από το γινόμενο του γεωμετρικού παράγοντα με τον αριθμό των προηγούμενων επιτρεπτών αποτυχημένων αναθέσεων, δίνεται από το γινόμενο της βάσης με το συντελεστή Las Vegas στη συγκεκριμένη επανάληψη της επανεκκίνησης. Η ακολουθία των συντελεστών αυτών δίνεται αναδρομικά από το πρόθεμα της υποακολουθίας. Ξεκινώντας από το πρόθεμα 1, το  $(k + 1)^t$  h πρόθεμα είναι το πρόθεμα  $(k)^t$  h επαναλαμβανόμενο grow φορές και ακολουθούμενο από το συντελεστή  $grow^k$  [10].

## Κεφάλαιο 4

### Μοντελοποίηση Προβλημάτων Προγραμματισμού Δράσης σε Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών

---

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Εισαγωγή                                                     | 31 |
| 4.2 Ο επιλυτής Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών Choco Solver | 32 |
| 4.3 Το αρχείο output.sas                                         | 33 |
| 4.3.1 Μετρικό τμήμα αρχείου output.sas                           | 33 |
| 4.3.2 Τμήμα Μεταβλητών αρχείου output.sas                        | 34 |
| 4.3.3 Τμήμα Αρχικής Κατάστασης αρχείου output.sas                | 34 |
| 4.3.4 Τμήμα Τελικής Κατάστασης αρχείου output.sas                | 35 |
| 4.3.5 Τμήμα Δράσεων αρχείου output.sas                           | 36 |
| 4.3.6 Τμήμα Αξιωμάτων αρχείου output.sas                         | 37 |
| 4.4 Μοντελοποίηση του προβλήματος στην Choco                     | 38 |
| 4.4.1 Μεταβλητές και Πεδία Ορισμών τους                          | 39 |
| 4.4.2 Περιορισμοί                                                | 40 |

---

#### 4.1 Εισαγωγή

Τα προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών σε πεπερασμένα πεδία ορισμών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- α) Άμεσα, ορίζοντας ένα πρόβλημα Προγραμματισμού Δράσης ως ένα Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών. Είναι εφικτό να κωδικοποιήσουμε ένα πρόβλημα προγραμματισμού δράσης σε ένα πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών και να βασιστούμε αποκλειστικά πάνω στα εργαλεία των ΠΠΠ για τον προγραμματισμό της δράσης.

β) Έμμεσα, με το να χρησιμοποιήσουμε τεχνικές των ΠΠΠ σε προσεγγίσεις σχετικές με τον προγραμματισμό δράσης [6].

Επιπλέον, τα ΠΠΠ έχουν άμεση σχέση με τον προγραμματισμό δράσης, καθώς αρκετές ευρετικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στον προγραμματισμό δράσης, βασίζονται σε τεχνικές των ΠΠΠ. Ακόμη, οι επιλυτές ΠΠΠ είναι γρηγορότεροι από αλγόριθμους που αναζητούν λύση στο χώρο των καταστάσεων (state-space searchers), καθώς οι επιλυτές αυτοί, μπορούν γρήγορα να αφαιρέσουν μεγάλα τμήματα του χώρου αναζήτησης [6, 18]. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν και οι Ghallab, Nau & Traverso (2004):

«Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα στη μετατροπή ενός προβλήματος προγραμματισμού δράσης σε ένα πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών. Ανάμεσά τους είναι η διάθεση αρκετών τεχνικών φιλτραρίσματος και αναζήτησης οι οποίες μπορούν να επιταχύνουν την αναζήτηση και παρέχουν ευρετικές συναρτήσεις, “ κλάδεμα” του χώρου αναζήτησης και πληροφορίες ελέγχου»

#### **4.2 Ο επιλυτής Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών Choco Solver**

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε χρήση της βιβλιοθήκης Choco. Η Choco είναι γραμμένη σε Java και διανέμεται ως ελεύθερο λογισμικό, κάτω από την άδεια χρήσης BSD. Σκοπός της είναι η περιγραφή πραγματικών συνδυαστικών προβλημάτων με τη μορφή προβλημάτων ικανοποίησης περιορισμών και η επίλυσή τους με τεχνικές ικανοποίησης περιορισμών. Η Choco είναι από τους γρηγορότερους επιλυτές Προβλημάτων Ικανοποίησης Περιορισμών. Πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2000 και έκτοτε έχει σημειώσει μεγάλη επιτυχία. Ανάμεσα στους λόγους για τους οποίους έχει γίνει γνωστή είναι το γεγονός ότι είναι εύκολη στη χρήση, είναι επεκτάσιμη και επίσης είναι γραμμένη σε μια πολύ διαδεδομένη γλώσσα (Java). Επιπλέον, προσφέρει διάφορα είδη μεταβλητών (integer, boolean, set και real), πολλούς καθολικούς περιορισμούς (allDifferent, count, nvalues, κλπ), ρυθμιζόμενη αναζήτηση (custom search, activity-based search, large neighborhood search κλπ) και ανάλυση των συγκρούσεων (conflict-based back jumping, dynamic backtracking, path repair κλπ) [13]. Επιπρόσθετα, μπορεί να εφαρμόσει και τους 5 αλγόριθμους συνέπειας ακμής



ανάμεσα σε δυαδικούς περιορισμούς, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.6, για να «κλαδέψει» το δέντρο αναζήτησης.

### 4.3 Το αρχείο `output.sas`

Για την μοντελοποίηση των προβλημάτων προγραμματισμού δράσης στη Choco, χρησιμοποιήσαμε το αρχείο `output.sas`, το οποίο παράγεται από τον επιλυτή προβλημάτων προγραμματισμού δράσης LAMA [15]. Το αρχείο αυτό είναι ένα ενδιαμέσο αρχείο, το οποίο περιλαμβάνει τις μεταβλητές και τα πεδία ορισμού τους, τις τιμές που έχουν οι μεταβλητές αυτές στην αρχική και τελική κατάσταση, καθώς επίσης και όλες τις πιθανές δράσεις με τις προϋποθέσεις και τα αποτελέσματά τους.

Το αρχείο αυτό αποτελείται από έξι μέρη:

- α) το Μετρικό τμήμα (Metric section)
- β) το τμήμα των Μεταβλητών (Variable section)
- γ) το τμήμα της Αρχικής Κατάστασης (Initial state section)
- δ) το τμήμα της Τελικής Κατάστασης (Goal section)
- ε) το τμήμα των Δράσεων (Operator section) και τέλος
- στ) το τμήμα των Αξιωμάτων (Axiom section)

Ακολουθεί η περιγραφή του κάθε τμήματος ξεχωριστά.

#### 4.3.1 Μετρικό τμήμα αρχείου `output.sas`

Το Μετρικό τμήμα αρχίζει με τη γραμμή `"begin_metric"`, ακολουθούμενη από μία γραμμή η οποία περιέχει 0 ή 1. Αν η γραμμή περιέχει το 0, ο επιλυτής LAMA θα προσπαθήσει να βρει το βέλτιστο μονοπάτι. Αν η γραμμή περιέχει το 1, τότε ο επιλυτής θα προσπαθήσει να βρει το μονοπάτι με το μικρότερο κόστος. Τέλος το τμήμα αυτό τελειώνει με τη γραμμή `"end_metric"`. Το συγκεκριμένο τμήμα δεν χρειάζεται για τη μοντελοποίηση και για αυτό το αγνοούμε.

#### 4.3.2 Τμήμα Μεταβλητών αρχείου output.sas

Το τμήμα των Μεταβλητών αρχίζει με τη γραμμή "begin\_variables", ακολουθούμενη από μία γραμμή η οποία περιέχει τον αριθμό των μεταβλητών. Στη συνέχεια ακολουθεί μία γραμμή για κάθε μεταβλητή η οποία περιέχει τρεις πληροφορίες για τη μεταβλητή:

- α) το όνομα της μεταβλητής (στη μορφή "var<i>", όπου <i> ο δείκτης της μεταβλητής, ξεκινώντας από το 0).
- β) το μέγεθος του πεδίου ορισμού της, και
- γ) το επίπεδο αξιώματος της μεταβλητής.

Το τμήμα αυτό τελειώνει με τη γραμμή "end\_variables".

Πιο κάτω φαίνεται ένα παράδειγμα του τμήματος αυτού από το πρόβλημα του “Κόσμου των Κύβων” (Block World).

```
begin_variables
6
var0 4 -1
var1 4 -1
var2 4 -1
var3 2 -1
var4 2 -1
var5 2 -1
end_variables
```

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, βλέπουμε ότι υπάρχουν έξι μεταβλητές (var0 μέχρι var5), από τις οποίες οι πρώτες τρεις μπορούν να πάρουν τέσσερις διαφορετικές τιμές (στο σύνολο {0, 1, 2, 3}) και οι υπόλοιπες τρεις μπορούν να πάρουν δύο διαφορετικές τιμές (στο σύνολο {0, 1}), ενώ όλες ανήκουν στο επίπεδο αξιώματος -1 (αυτό συμβαίνει με όλες τις μεταβλητές στα προβλήματα που είναι κωδικοποιημένα στη γλώσσα STRIPS).

#### 4.3.3 Τμήμα Αρχικής Κατάστασης αρχείου output.sas

Το τμήμα της Αρχικής Κατάστασης, αρχίζει με τη γραμμή "begin\_state", ακολουθούμενο από μία γραμμή για κάθε μεταβλητή του προβλήματος. Η κάθε γραμμή περιέχει ένα και μόνο αριθμό, ο οποίος δηλώνει την τιμή της κάθε μεταβλητής στην

αρχική κατάσταση. Το τμήμα αυτό τελειώνει με τη γραμμή "end\_state". Πιο κάτω βλέπουμε την αρχική κατάσταση του προβλήματος του «Κόσμου των Κύβων»

```
begin_state
0
1
3
0
1
0
end_state
```

Έτσι, η αρχική τιμή της var0 στο παράδειγμα είναι 0, της var1 είναι 1, της var2 είναι 3 κ.ο.κ.

#### 4.3.4 Τμήμα Τελικής Κατάστασης αρχείου output.sas

Το τμήμα της Τελικής κατάστασης, αρχίζει με τη γραμμή "begin\_goal", ακολουθούμενη από μία γραμμή η οποία αναφέρει πόσες μεταβλητές συμμετέχουν στην τελική κατάσταση. Στη συνέχεια ακολουθούν τόσες γραμμές, όσες είναι και οι μεταβλητές που συμμετέχουν στην τελική κατάσταση. Σε κάθε μία γραμμή αναγράφεται ο δείκτης της μεταβλητής και η τιμή που πρέπει να έχει στην τελική κατάσταση. Το τμήμα τελειώνει με τη γραμμή "end\_goal". Η τελική κατάσταση του προβλήματος του «Κόσμου των Κύβων» είναι η πιο κάτω:

```
begin_goal
3
0 2
1 2
2 2
end_goal
```

Παρατηρούμε εδώ ότι στην τελική κατάσταση του συγκεκριμένου προβλήματος συμμετέχουν μόνο τρεις από τις έξι μεταβλητές. Συγκεκριμένα, στην τελική κατάσταση, η μεταβλητή var0 πρέπει να έχει την τιμή 2, η μεταβλητή var1 την τιμή 2 και η μεταβλητή var2 την τιμή 2. Επομένως, το πρόβλημα λύνεται όταν οι μεταβλητές αυτές πάρουν τις προαναφερθείσες τιμές, ανεξάρτητα από το ποια τιμή θα έχουν οι υπόλοιπες μεταβλητές.

#### 4.3.5 Τμήμα Δράσεων αρχείου output.sas

Το τμήμα των Δράσεων ξεκινά με ένα αριθμό, ο οποίος υποδηλώνει τον αριθμό των διαθέσιμων δράσεων και στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή της κάθε δράσης. Η περιγραφή της κάθε δράσης ξεκινά με τη γραμμή "begin\_operator" και περιλαμβάνει τις ακόλουθες πληροφορίες:

- α) Μια γραμμή με το όνομα της δράσης.
- β) Μια γραμμή η οποία περιέχει ένα αριθμό, ο οποίος δηλώνει πόσες μεταβλητές θα διατηρήσουν την τιμή τους μετά την εκτέλεση της δράσης.
- γ) Ακολουθούν τόσες γραμμές, όσες και οι μεταβλητές που θα διατηρήσουν την τιμή τους (σημείο β) πιο πάνω). Η κάθε γραμμή περιλαμβάνει δύο αριθμούς. Ο πρώτος είναι ο δείκτης της μεταβλητής και ο δεύτερος η τιμή που πρέπει να έχει τόσο πριν, όσο και μετά την εκτέλεση της δράσης.
- δ) Η επόμενη γραμμή περιέχει ένα αριθμό, ο οποίος δηλώνει πόσες μεταβλητές θα αλλάξουν τιμή μετά την εκτέλεση της δράσης.
- ε) Ακολουθούν τόσες γραμμές, όσες και οι μεταβλητές οι οποίες αλλάζουν τιμή. Η κάθε γραμμή περιλαμβάνει τέσσερις αριθμούς. Ο πρώτος αριθμός αναφέρει τον αριθμό των συνθηκών του αποτελέσματος (effect conditions), ο οποίος είναι 0 στα προβλήματα της γλώσσας STRIPS και έτσι τον αγνοούμε. Ο δεύτερος αριθμός είναι ο δείκτης της μεταβλητής που θα αλλάξει τιμή. Ο τρίτος αριθμός είναι η τιμή που πρέπει να έχει η μεταβλητή αυτή για να εκτελεστεί η δράση, ή -1 αν η μεταβλητή μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή πριν την εκτέλεση της δράσης. Τέλος, ο τέταρτος αριθμός, είναι η τιμή που πρέπει να έχει η μεταβλητή μετά την εκτέλεση της δράσης.
- στ) Η επόμενη γραμμή αναγράφει το κόστος της δράσης (συνήθως 0).
- ζ) Η περιγραφή της δράσης τελειώνει με τη γραμμή "end\_operator".

Ακολουθεί ένα μέρος του τμήματος δράσεων του προβλήματος του «Κόσμου των Κύβων».

```

27
begin_operator
move-to-table c a
1
3 0
2
0 2 3 2
0 4 -1 0
0
end_operator
begin_operator
move b table b
0
2
0 1 1 3
0 5 0 1
0
end_operator
..... (ακολουθεί η περιγραφή των υπόλοιπων 25 δράσεων)

```

Ο αριθμός 27 στην πρώτη γραμμή δηλώνει ότι θα ακολουθήσει η περιγραφή 27 δράσεων. Η πρώτη δράση με το όνομα “move-to-table c a” έχει μία μεταβλητή η οποία θα διατηρήσει την τιμή της. Συγκεκριμένα, η μεταβλητή var3 πρέπει να έχει την τιμή 0 τόσο πριν, όσο και μετά τη εκτέλεση της δράσης. Έπειτα, ακολουθούν δύο μεταβλητές των οποίων η τιμή θα αλλάξει. Συγκεκριμένα, η μεταβλητή var2 πρέπει να έχει την τιμή 3 πριν την εκτέλεση της δράσης και την τιμή 2 μετά, ενώ η μεταβλητή var4 πρέπει να έχει την τιμή 0 μετά την εκτέλεση της δράσης, ανεξάρτητα από το ποια τιμή είχε πριν την εκτέλεσή της.

Η δεύτερη δράση με το όνομα “move b table b”, δεν έχει καμία μεταβλητή η οποία θα διατηρήσει την τιμή της, ενώ έχει δύο μεταβλητές οι οποίες θα αλλάξουν τιμή με την εκτέλεση της δράσης (η μεταβλητή var1 από 1 θα γίνει 3 και η μεταβλητή var5 από 0 θα γίνει 1).

#### 4.3.6 Τμήμα Αξιωμάτων αρχείου output.sas

Το τμήμα των Αξιωμάτων δεν θα μας απασχολήσει καθώς δεν υπάρχουν αξιώματα στα προβλήματα προγραμματισμού δράσης τα οποία είναι γραμμένα στη γλώσσα STRIPS.

#### 4.4 Μοντελοποίηση του προβλήματος στην Choco

Αφού περιγράψαμε το αρχείο το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε ως βάση για τη μετάφραση του προβλήματός μας, πάμε τώρα να δούμε πώς θα το χρησιμοποιήσουμε για να μοντελοποιήσουμε το πρόβλημα.

Ένα Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών περιλαμβάνει μεταβλητές, τα πεδία ορισμού τους και περιορισμούς οι οποίοι διέπουν τις μεταβλητές αυτές. Εδώ, αξίζει να αναφέρουμε ότι οι περιορισμοί μεταξύ μεταβλητών σε ένα πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών, μπορούν να διατυπωθούν είτε έμμεσα μέσω μιας ισότητας/ανισότητας, είτε άμεσα μέσω των επιτρεπτών συνδυασμών ανάμεσα στις μεταβλητές. Για παράδειγμα, έστω οι μεταβλητές  $X, Y$  με πεδία ορισμού  $D_x = D_y = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ . Έστω τώρα ότι έχουμε τον περιορισμό ότι το άθροισμα των μεταβλητών αυτών πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 10. Ένας τρόπος να ορίσουμε τον περιορισμό αυτό είναι μέσω της ανισότητας  $X + Y > 10$ . Ένας άλλος τρόπος είναι να ορίσουμε όλες τις επιτρεπτές πλειάδες (tuples) αυτών των μεταβλητών σε ένα πίνακα. Έτσι ο περιορισμός αυτός μπορεί να περιγραφεί με τον ακόλουθο πίνακα:

| X | Y |
|---|---|
| 4 | 7 |
| 5 | 6 |
| 5 | 7 |
| 6 | 5 |
| 6 | 6 |
| 6 | 7 |
| 7 | 4 |
| 7 | 5 |
| 7 | 6 |
| 7 | 7 |

Πίνακας 4.1 – Παράδειγμα περιορισμών με τη χρήση πλειάδων

Για τη μοντελοποίηση του προβλήματος στη Choco, χρησιμοποιήσαμε το δεύτερο τρόπο για την περιγραφή των περιορισμών.

#### 4.4.1 Μεταβλητές και Πεδία Ορισμών τους

Οι μεταβλητές του Προβλήματος Ικανοποίησης Περιορισμών αποτελούν οι μεταβλητές του αρχείου `output.sas`, όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3.2 πιο πάνω. Οι τιμές των μεταβλητών αυτών περιγράφουν μία κατάσταση σε μία δεδομένη χρονική στιγμή. Αφού σκοπός του προβλήματος είναι να μεταβούμε από μια αρχική κατάσταση σε μια άλλη τελική κατάσταση, αυτό συνεπάγεται ότι οι μεταβλητές θα αλλάζουν τιμή καθώς εκτελούνται κάποιες δράσεις. Επομένως οι μεταβλητές του Προβλήματος Ικανοποίησης Περιορισμών είναι όσες και οι μεταβλητές του αρχείου `output.sas` (με τα πεδία ορισμού τους), μία για κάθε χρονική στιγμή που χρειάζεται για να λυθεί το πρόβλημα. Αν για παράδειγμα το αρχείο `output.sas` περιλαμβάνει μια μεταβλητή `var0` με πεδίο ορισμού  $\{0, 1, 2, 3\}$  και το πρόβλημα λύνεται σε τρία βήματα, τότε στο Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών η μεταβλητή αυτή θα μοντελοποιηθεί με τις μεταβλητές `var0_t0`, `var0_t1`, `var0_t2` και `var0_t3` με την καθεμία να έχει ως πεδίο ορισμού  $\{0,1,2,3\}$ .

Για να αλλάξει όμως μία μεταβλητή την τιμή της σε μια άλλη τιμή, αυτό προϋποθέτει την εκτέλεση μιας δράσης. Συνεπώς και οι δράσεις πρέπει να μοντελοποιηθούν ως μεταβλητές. Σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, μία δράση μπορεί ή όχι να εκτελεστεί. Επομένως, οι μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τις δράσεις έχουν πεδίο ορισμού το σύνολο  $\{0, 1\}$  με την τιμή 1 να υποδηλώνει ότι η δράση εκτελέστηκε και το 0 ότι η δράση δεν εκτελέστηκε. Δεδομένου ότι για τη λύση του προβλήματος μπορεί να χρειαστεί να παρέλθουν αρκετές χρονικές στιγμές, οι δράσεις μοντελοποιούνται ως μεταβλητές (με πεδίο ορισμού το σύνολο  $\{0, 1\}$ ), μία για κάθε χρονική στιγμή του προβλήματος. Και εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι δράσεις όπως περιγράφονται στο αρχείο `output.sas` (ενότητα 4.3.5). Αν για παράδειγμα στο αρχείο `output.sas` υπάρχει μια δράση με το όνομα `“move-to-table c a”` και το πρόβλημα λύνεται σε τρία βήματα, τότε η δράση αυτή μοντελοποιείται με τις μεταβλητές `“move-to-table c a_t0”`, `“move-to-table c a_t1”` και `“move-to-table c a_t2”` με την καθεμία να έχει ως πεδίο ορισμού το σύνολο  $\{0, 1\}$ . Παρατηρούμε εδώ ότι παρόλο που το πρόβλημα λύνεται σε τρία

βήματα, έχουμε μεταβλητές μόνο μέχρι τη χρονική στιγμή 2 (‘move-to-table c a\_t2’). Αυτό συμβαίνει διότι αν η δράση συμβεί τη χρονική στιγμή 2, τα αποτελέσματά της θα φανούν κατά την επόμενη χρονική στιγμή η οποία όμως είναι και η τελευταία, επομένως καμία δράση δεν χρειάζεται να εκτελεστεί τη χρονική στιγμή 3.

#### 4.4.2 Περιορισμοί

Μέχρι τώρα περιγράψαμε πώς μοντελοποιούμε τις μεταβλητές και τις δράσεις ενός προβλήματος προγραμματισμού δράσης σε μεταβλητές ενός Προβλήματος Ικανοποίησης Περιορισμών. Οι περιορισμοί που διέπουν αυτές τις μεταβλητές, προκύπτουν και πάλι μέσα από το αρχείο output.sas. Όπως περιγράψαμε πιο πάνω, το αρχείο αυτό χωρίζεται σε τμήματα. Από τα τμήματα της αρχικής και της τελικής κατάστασης, προκύπτουν αυτόματα κάποιοι περιορισμοί. Έστω ότι τα τμήματα αυτά είναι τα ίδια όπως περιγράφηκαν πιο πάνω (στην περιγραφή του αρχείου output.sas για το πρόβλημα του «Κόσμου των Κύβων»), και έστω επίσης ότι το πρόβλημα λύνεται σε τρία βήματα (στην πραγματικότητα, το μήκος του πλάνου δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων. Θα αναφερθούμε στη συνέχεια πώς το χειριζόμαστε αυτό). Έτσι οι περιορισμοί που προκύπτουν είναι:

Από το τμήμα της αρχικής κατάστασης

- var0\_t0 = 0
- var1\_t0 = 1
- var2\_t0 = 3
- var3\_t0 = 0
- var4\_t0 = 1
- var5\_t0 = 0

Από το τμήμα της τελικής κατάστασης

- var0\_t3 = 2
- var1\_t3 = 2
- var2\_t3 = 2

Όλοι οι υπόλοιποι περιορισμοί του προβλήματος, προκύπτουν μέσα από την περιγραφή των δράσεων. Ας δούμε τους περιορισμούς που προκύπτουν μέσα από τη δράση move-to-table c a, όπως περιγράφηκε πιο πάνω. Η δράση αυτή έχει μία μεταβλητή η οποία θα διατηρήσει την τιμή της μετά την εκτέλεση της δράσης. Συγκεκριμένα, η μεταβλητή



var3 (η οποία έχει πεδίο ορισμού το σύνολο  $\{0, 1\}$ ) πρέπει να έχει την τιμή 0, τόσο πριν, όσο και μετά την εκτέλεση της δράσης. Επομένως, προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες επιτρεπτών τιμών:

| move-to-table c a_t(i) | var3_t(i) |
|------------------------|-----------|
| 1                      | 0         |
| 0                      | 0         |
| 0                      | 1         |

Πίνακας 4.2 – Επιτρεπτοί συνδυασμοί τιμών

| move-to-table c a_t(i) | var3_t(i + 1) |
|------------------------|---------------|
| 1                      | 0             |
| 0                      | 0             |
| 0                      | 1             |

Πίνακας 4.3 – Επιτρεπτοί συνδυασμοί τιμών

Συγκεκριμένα, ο Πίνακας 4.2 μας δείχνει ότι για να εκτελεστεί η δράση move-to-table c a τη χρονική στιγμή  $t(i)$ , δηλαδή η μεταβλητή move-to-table c a\_t(i) να πάρει την τιμή 1, πρέπει η μεταβλητή var3 τη χρονική στιγμή  $t(i)$  να έχει την τιμή 0 ( $\text{var3}_t(i) = 0$ ). Αν η δράση δεν εκτελεστεί, δηλαδή η μεταβλητή move-to-table c a\_t(i) = 0, τότε η μεταβλητή var3 τη χρονική στιγμή  $t(i)$  μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή από το πεδίο ορισμού της (στη συγκεκριμένη περίπτωση 0 ή 1).

Όμοια, ο Πίνακας 4.3 μας δείχνει ότι, αφού η μεταβλητή var3 πρέπει να διατηρήσει την τιμή της και μετά την εκτέλεση της δράσης, η δράση θα εκτελεστεί τη χρονική στιγμή  $i$  ( $\text{move-to-table c a}_t(i) = 1$ ) μόνο αν η μεταβλητή var3 τη χρονική στιγμή  $t(i + 1)$  έχει την τιμή 0 ( $\text{var3}_t(i+1) = 0$ ). Αν η δράση δεν εκτελεστεί, η μεταβλητή var3 τη χρονική στιγμή  $t(i+1)$  μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή.

Η δράση αυτή όμως έχει και δύο μεταβλητές οι οποίες θα αλλάξουν τιμή. Συγκεκριμένα, η μεταβλητή *var2* πρέπει να έχει την τιμή 3 πριν την εκτέλεση της δράσης και την τιμή 2 μετά την εκτέλεσή της, ενώ η μεταβλητή *var4* πρέπει να έχει την τιμή 0 μετά την εκτέλεση της δράσης, ανεξάρτητα από την τιμή που είχε πριν. Έτσι προκύπτουν οι πιο κάτω πίνακες επιτρεπτών τιμών ανάμεσα στις μεταβλητές.

| move-to-table c a <sub>t</sub> (i) | var2 <sub>t</sub> (i) |
|------------------------------------|-----------------------|
| 1                                  | 3                     |
| 0                                  | 0                     |
| 0                                  | 1                     |
| 0                                  | 2                     |
| 0                                  | 3                     |

Πίνακας 4.4 – Επιτρεπτοί συνδυασμοί τιμών

| move-to-table c a <sub>t</sub> (i) | var2 <sub>t</sub> (i + 1) |
|------------------------------------|---------------------------|
| 1                                  | 2                         |
| 0                                  | 0                         |
| 0                                  | 1                         |
| 0                                  | 2                         |
| 0                                  | 3                         |

Πίνακας 4.5 – Επιτρεπτοί συνδυασμοί τιμών

| move-to-table c a <sub>t</sub> (i) | var4 <sub>t</sub> (i + 1) |
|------------------------------------|---------------------------|
| 1                                  | 0                         |
| 0                                  | 0                         |
| 0                                  | 1                         |

Πίνακας 4.6 – Επιτρεπτοί συνδυασμοί τιμών

Η πρώτη γραμμή του Πίνακα 4.4 μας δείχνει ότι για να εκτελεστεί η δράση *move-to-table c a* τη χρονική στιγμή *t*(i), η μεταβλητή *var2* τη χρονική στιγμή *t*(i) πρέπει να έχει την τιμή 3. Οι υπόλοιπες γραμμές μας δείχνουν ότι αν η δράση δεν εκτελεστεί, η

μεταβλητή var2 τη χρονική στιγμή  $t(i)$  μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή από το πεδίο ορισμού της (το σύνολο  $\{0,1,2,3\}$ ).

Όμοια, ο πίνακας 4.5 μας δείχνει ότι τι για να εκτελεστεί η δράση move-to-table c a τη χρονική στιγμή  $t(i)$ , η μεταβλητή var2 τη χρονική στιγμή  $t(i + 1)$  πρέπει να έχει την τιμή 2, ενώ αν δεν εκτελεστεί μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή.

Τέλος, ο Πίνακας 4.6 μας δείχνει ότι για να εκτελεστεί η δράση αυτή τη χρονική στιγμή  $t(i)$ , η μεταβλητή var4 τη χρονική στιγμή  $t(i + 1)$  πρέπει να έχει την τιμή 0, ενώ αν δεν εκτελεστεί, μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή από το πεδίο ορισμού της. Παρατηρούμε εδώ ότι δεν υπάρχει Πίνακας επιτρεπτών τιμών ανάμεσα στις μεταβλητές move-to-table c a  $t(i)$  και var4  $t(i)$ , επειδή η πράξη μπορεί να εκτελεστεί ανεξάρτητα από το τιμή έχει η μεταβλητή var4 τη χρονική στιγμή  $t(i)$ · δεν υπάρχει δηλαδή περιορισμός ανάμεσα στις δύο αυτές μεταβλητές.

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο θα δημιουργηθούν και οι πίνακες επιτρεπτών τιμών για όλες τις άλλες δράσεις που υπάρχουν στο τμήμα Δράσεων του αρχείου output.sas (στο παράδειγμά μας υπάρχουν συνολικά 27 δράσεις). Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι όλοι οι πιο πάνω πίνακες θα δημιουργηθούν εις τριπλούν (αφού υποθέσαμε ότι το πρόβλημα λύνεται σε τρία βήματα), ένας για κάθε  $i$ , όπου  $0 \leq i \leq 2$ .

Τέλος, πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι λόγω της στατικότητας του κόσμου του προβλήματος, καμία μεταβλητή δεν μπορεί να αλλάξει τιμή αν δεν έχει επιδράσει πρώτα πάνω της μία δράση. Για την υλοποίηση του πιο πάνω περιορισμού, καταγράφουμε για κάθε μεταβλητή σε μία λίστα, όλες τις δράσεις οι οποίες μπορεί να αλλάξουν την τιμή αυτής της μεταβλητής. Ας πάρουμε για παράδειγμα τη δράση ‘move-to-table c a’ που περιγράφηκε πιο πάνω. Η δράση αυτή αλλάζει την τιμή των μεταβλητών var2 και var4. Έστω τώρα και η δράση ‘move c a b’:

```

begin_operator
move c a b
1
3 0
3
0 2 3 0
0 4 -1 0
0 5 0 1
0
end_operator

```

Παρατηρούμε ότι η δράση αυτή αλλάζει τις τιμές των μεταβλητών `var2`, `var4` και `var5`. Επομένως η λίστα για τη μεταβλητή `var2` (και για τη `var4` επίσης) θα περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις δράσεις “move-to-table c a” και “move c a b”. Ακολουθώντας, για κάθε χρονική στιγμή, όλες οι δράσεις που περιλαμβάνονται στη λίστα που επηρεάζει τη μεταβλητή `var2`, μπαίνουν σε ένα πίνακα και προστίθεται ο περιορισμός ότι αν η μεταβλητή `var2` τη χρονική στιγμή  $i$  έχει διαφορετική τιμή από τη χρονική στιγμή  $i + 1$ , τότε το άθροισμα του πίνακα πρέπει να είναι ίσο με 1 (αφού οι δράσεις έχουν πεδίο ορισμού  $\{0, 1\}$ , αυτό ισοδυναμεί με το να έχει εκτελεστεί μια δράση). Ακολουθεί η μαθηματική διατύπωση του περιορισμού:

```

if var2_t(i) != var2_t(i + 1)
    then sumOf(Array) = 1

```

όπου `Array` ο πίνακας ο οποίος μεταξύ άλλων περιέχει τις μεταβλητές “move-to-table c a\_t(i)” και “move c a b\_t(i)”. Με άλλα λόγια ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει ότι τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $i$ , αν η μεταβλητή `var2` αλλάζει τιμή, τότε μία μόνο από τις μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τις δράσεις οι οποίες την επηρεάζουν θα πάρει την τιμή 1 (θα έχει δηλαδή εκτελεστεί). Ο πιο πάνω περιορισμός θα δημιουργηθεί για όλες τις μεταβλητές του προβλήματος και για κάθε χρονική στιγμή η οποία απαιτείται για να λυθεί το πρόβλημα.

Στην παραπάνω περιγραφή της μοντελοποίησης του προβλήματος προγραμματισμού δράσης σε Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών, υποθέσαμε ότι είναι γνωστό το μήκος του πλάνου (τρία βήματα). Στην πραγματικότητα όμως, στα προβλήματα προγραμματισμού δράσης δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων το μέγεθος του πλάνου.

Το μέγεθος του πλάνου όμως είναι απαραίτητο για τη μοντελοποίηση του προβλήματος σε ένα ΠΠΠ όπως το περιγράψαμε, καθώς επηρεάζει τον αριθμό των μεταβλητών και αλλάζει τους περιορισμούς. Στο πιο πάνω παράδειγμα όπου η μεταβλητή  $var0$  πρέπει να έχει την τιμή 2 στην τελική κατάσταση δημιουργήσαμε τον περιορισμό  $var0\_t3 = 2$ . Αν τώρα το πρόβλημα λύνεται σε τέσσερα βήματα τότε ο πιο πάνω περιορισμός μετατρέπεται σε  $var0\_t4 = 2$ . Επομένως, αφού το μέγεθος του πλάνου είναι απαραίτητο για την μοντελοποίηση, υποθέτουμε ότι γνωρίζουμε το μέγεθος του. Αρχικά ο χρήστης εισάγει το μέγιστο αριθμό βημάτων στα οποία επιθυμεί να λυθεί το πρόβλημα. Στη συνέχεια, μοντελοποιούμε το πρόβλημα έτσι ώστε το μέγεθος του πλάνου να είναι 1. Αν δεν υπάρχει λύση, τότε διαγράφουμε όλες τις μεταβλητές και τους περιορισμούς και μοντελοποιούμε ξανά το πρόβλημα με μέγεθος πλάνου 2, κ.ο.κ.. Η αναζήτηση λύσης σταματά όταν βρεθεί κάποια λύση ή όταν φτάσουμε το μέγιστο αριθμό βημάτων.

Παρατηρήστε εδώ ότι αν το μήκος του πλάνου είναι μεγάλο (έστω  $X$ ), τότε η εκτέλεση του προγράμματος θα είναι αρκετά αργή, καθώς θα αποτύχει  $X - 1$  φορές να λύσει το πρόβλημα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι κάθε φορά που το μήκος του πλάνου στην μοντελοποίηση αυξάνεται κατά ένα, αυξάνεται και ο αριθμός των μεταβλητών και των περιορισμών, με αποτέλεσμα το κάθε βήμα να είναι πιο αργό στην επίλυση από το προηγούμενο. Στο κεφάλαιο 6 θα δούμε τρόπους με τους οποίους μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την εκτέλεση του προγράμματος.

## Κεφάλαιο 5

### Πειραματικά Αποτελέσματα

---

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 Εισαγωγή                                                                                                            | 46 |
| 5.2 Χρόνοι εκτέλεσης με τις προκαθορισμένες στρατηγικές αναζήτησης και επανεκκίνησης του προβλήματος                    | 47 |
| 5.3 Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και χωρίς στρατηγική επανεκκίνησης                        | 49 |
| 5.4 Χρόνοι εκτέλεσης με την προκαθορισμένη στρατηγική αναζήτησης και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart | 50 |
| 5.5 Χρόνοι εκτέλεσης με την προκαθορισμένη στρατηγική αναζήτησης και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart        | 52 |
| 5.6 Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart    | 54 |
| 5.7 Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart           | 56 |
| 5.8 Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης activityBasedSearch                                                    | 57 |

---

#### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, μετά την μοντελοποίηση του Προβλήματος Προγραμματισμού Δράσης στη Choco, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν με σκοπό να προσδιοριστεί ποιος από τους διαθέσιμους αλγόριθμους της Choco είναι ο πιο αποδοτικός για τα Προβλήματα Προγραμματισμού Δράσης. Ελέγχθηκαν ακόμη και διάφορες στρατηγικές αναζήτησης όπως η intVarSearch και η activityBasedSearch που προσφέρει η Choco καθώς επίσης και διάφορες στρατηγικές επανεκκίνησης του προβλήματος. Για την πειραματική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν κλασικά προβλήματα προγραμματισμού δράσης όπως το Satellite, Storage, DriverLog, Depots

κ.ά. Όλα τα πειράματα έτρεξαν σε υπολογιστή AMD 1700X που τρέχει στα 3.4GHz, με 16GB RAM σε περιβάλλον Linux (Ubuntu 16.04 LTS).

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι λόγω έκτασης, θα παρουσιάσουμε μόνο ένα μέρος των αποτελεσμάτων. Τον πλήρη κατάλογο με τα αποτελέσματα μπορείτε να τον βρείτε στο παράρτημα «B».

## 5.2 Χρόνοι εκτέλεσης με τις προκαθορισμένες στρατηγικές αναζήτησης και επανεκκίνησης του προβλήματος

Τα πρώτα πειράματα που έγιναν για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, είχαν ως σκοπό την εύρεση του πιο αποδοτικού αλγόριθμου, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, για την επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης, χρησιμοποιώντας την προεπιλεγμένη από τη Choco στρατηγική αναζήτησης και χωρίς τον ορισμό κάποιας στρατηγικής επανεκκίνησης του προβλήματος.

Στους πίνακες που ακολουθούν αναφέρονται συγκριτικά οι χρόνοι αναζήτησης λύσης στα προβλήματα Satellite02 (λύση σε 12 βήματα), Storage04 (λύση σε 8 βήματα), Elev3 (λύση σε 7 βήματα), DriverLog07 (λύση σε 6 βήματα), Depots02 (λύση σε 8 βήματα) και DriverLog02 (λύση σε 9 βήματα).

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 140407          | 70214     | 19,608          |
| AC3        | 0              | 140407          | 70214     | 21,336          |
| AC3rm      | 0              | 140407          | 70214     | 20,561          |
| AC3bit+rm  | 0              | 126616          | 63345     | 20,715          |
| FC         | 0              | 135979          | 68001     | 17,693          |

Πίνακας 5.1.

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Satellite02 με τις προκαθορισμένες επιλογές

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 10998           | 5541      | 1,261           |
| AC3        | 0              | 10998           | 5541      | 1,324           |
| AC3rm      | 0              | 10998           | 5541      | 1,312           |
| AC3bit+rm  | 0              | 8273            | 4166      | 1,006           |
| FC         | 0              | 5767            | 2904      | 0,737           |

Πίνακας 5.2.

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Storage04 με τις προκαθορισμένες επιλογές

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 3720960         | 1860510   | 2072,090        |
| AC3        | 0              | 3720960         | 1860510   | 2324,474        |
| AC3rm      | 0              | 3720960         | 1860510   | 2405,282        |
| AC3bit+rm  | 0              | 2585984         | 1293014   | 1555,843        |
| FC         | 0              | 3233097         | 1616608   | 1414,100        |

Πίνακας 5.3.

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Elen3 με τις προκαθορισμένες επιλογές

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 211488          | 105763    | 15,898          |
| AC3        | 0              | 211488          | 105763    | 16,912          |
| AC3rm      | 0              | 211488          | 105763    | 16,517          |
| AC3bit+rm  | 0              | 111953          | 55993     | 9,531           |
| FC         | 0              | 98154           | 49089     | 7,195           |

Πίνακας 5.4.

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog07 με τις προκαθορισμένες επιλογές

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 39010           | 19543     | 5,832           |
| AC3        | 0              | 39010           | 19543     | 6,035           |
| AC3rm      | 0              | 39010           | 19543     | 6,044           |
| AC3bit+rm  | 0              | 34372           | 17230     | 4,974           |
| FC         | 0              | 35380           | 17711     | 4,919           |

Πίνακας 5.5. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Depots02 με τις προκαθορισμένες επιλογές

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 533687          | 266856    | 23,413          |
| AC3        | 0              | 533687          | 266856    | 24,969          |
| AC3rm      | 0              | 533687          | 266856    | 23,599          |
| AC3bit+rm  | 0              | 1741379         | 870804    | 82,644          |
| FC         | 0              | 1769392         | 884714    | 76,533          |

Πίνακας 5.6.

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog02 με τις προκαθορισμένες επιλογές

Αυτό που προκαλεί εντύπωση και στα 6 αυτά προβλήματα, είναι το γεγονός ότι οι αλγόριθμοι AC2001, AC3 και AC3rm έχουν ακριβώς τον ίδιο αριθμό αποτυχιών και οπισθοδρομήσεων, γεγονός που μας κάνει να υποθέτουμε ότι χτίζουν ακριβώς το ίδιο δέντρο αναζήτησης και επισκέπτονται τους κόμβους του με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, αν και ο χρόνος εκτέλεσής τους διαφέρει. Αυτή η παρατήρηση ισχύει σε όλα τα προβλήματα τα οποία ελέγξαμε και μας έδωσαν αποτέλεσμα μέσα στο χρονικό πλαίσιο των τεσσάρων ωρών που είχαμε βάλει (27 από τα 37 προβλήματα).



Οι αλγόριθμοι AC3bit+rm και FC είχαν, τις περισσότερες φορές, λιγότερες αποτυχίες και οπισθοδρομήσεις, δίνοντάς μας έτσι καλύτερους χρόνους εκτέλεσης. Αυτό όμως δεν ίσχυε σε όλες τις περιπτώσεις, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 5.6 πιο πάνω αναφορικά με το πρόβλημα DriverLog02, όπου οι αλγόριθμοι αυτοί είχαν πολύ χειρότερα αποτελέσματα.

### 5.3 Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και χωρίς στρατηγική επανεκκίνησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι χρόνοι εκτέλεσης για τα ίδια προβλήματα που είχαμε και στην ενότητα 5.2 πιο πάνω αλλά με τη χρήση της στρατηγικής αναζήτησης intVarSearch. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 190216          | 95146     | 31,831          |
| AC3        | 0              | 190216          | 95146     | 34,171          |
| AC3rm      | 0              | 190216          | 95146     | 32,688          |
| AC3bit+rm  | 0              | 186617          | 93321     | 33,747          |
| FC         | 0              | 218834          | 109429    | 32,605          |

Πίνακας 5.7 Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Satellite02 με intVarSearch

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 6738            | 3404      | 0,863           |
| AC3        | 0              | 6738            | 3404      | 0,842           |
| AC3rm      | 0              | 6738            | 3404      | 0,836           |
| AC3bit+rm  | 0              | 6463            | 3266      | 0,794           |
| FC         | 0              | 12605           | 6340      | 1,111           |

Πίνακας 5.8. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Storage04 με intVarSearch

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 3000972         | 1500557   | 1538,062        |
| AC3        | 0              | 3000972         | 1500557   | 1627,717        |
| AC3rm      | 0              | 3000972         | 1500557   | 1682,278        |
| AC3bit+rm  | 0              | 2065607         | 1032871   | 1153,723        |
| FC         | 0              | 5307546         | 2653808   | 2513,061        |

Πίνακας 5.9. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Elev3 με intVarSearch

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 36417           | 18228     | 3,208           |
| AC3        | 0              | 36417           | 18228     | 3,347           |
| AC3rm      | 0              | 36417           | 18228     | 3,354           |
| AC3bit+rm  | 0              | 38961           | 19504     | 3,300           |
| FC         | 0              | 74552           | 37295     | 5,663           |

Πίνακας 5.10. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog07 με intVarSearch

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 35140           | 17603     | 5,411           |
| AC3        | 0              | 35140           | 17603     | 5,654           |
| AC3rm      | 0              | 35140           | 17603     | 5,735           |
| AC3bit+rm  | 0              | 40288           | 20168     | 5,923           |
| FC         | 0              | 63543           | 31835     | 8,598           |

Πίνακας 5.11. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Depots02 με intVarSearch

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 0              | 1642147         | 821086    | 66,152          |
| AC3        | 0              | 1642147         | 821086    | 68,733          |
| AC3rm      | 0              | 1642147         | 821086    | 64,104          |
| AC3bit+rm  | 0              | 3023604         | 1511826   | 129,537         |
| FC         | 0              | 1170239         | 585144    | 44,273          |

Πίνακας 5.12. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog02 με intVarSearch

Τα αποτελέσματα αυτά, δεν μας βοηθούν να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα ως προς την αποδοτικότητα αυτής της στρατηγικής, καθώς σε ορισμένα προβλήματα ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος μειώνεται (Elev3, DriverLog07), σε άλλα αυξάνεται (Satellite02, DriverLog02), ενώ σε κάποια άλλα παραμένει περίπου ο ίδιος (Storage04, Depots02) σε σχέση με τις προκαθορισμένες επιλογές. Αξιοσημείωτο όμως είναι το γεγονός ότι και με αυτή τη στρατηγική οι αλγόριθμοι AC2001, AC3 και AC3rm έχουν ακριβώς τον ίδιο αριθμό αποτυχιών και οπισθοδρομήσεων.

#### 5.4 Χρόνοι εκτέλεσης με την προκαθορισμένη στρατηγική αναζήτησης και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart

Ακολουθώντας, επιλύσαμε τα παραπάνω προβλήματα χρησιμοποιώντας τη στρατηγική αναζήτησης Geometrical Restart, όπως αυτή περιγράφηκε στην ενότητα 3.7.2.1. Για την πειραματική αυτή αξιολόγηση, ως βάση θέτουμε τις 50 αποτυχίες, ως γεωμετρικό παράγοντα τα 2 και ως όριο επανεκκινήσεων τις 2000. Δηλαδή, στις 50 αποτυχημένες

αναθέσεις θα έχουμε την πρώτη επανεκκίνηση. Αφού ο γεωμετρικός παράγοντας είναι 2, η δεύτερη επανεκκίνηση θα γίνει στις 100 αποτυχημένες αναθέσεις, η τρίτη επανεκκίνηση στις 200 αποτυχημένες, η τέταρτη στις 400 κ.ο.κ.. Όταν το πρόβλημα επανεκκινήσει 2000 φορές, τότε δεν θα γίνει άλλη επανεκκίνηση του προβλήματος. Εδώ είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η στρατηγική αυτή είναι ανεξάρτητη για κάθε βήμα της αναζήτησης λύσης, καθώς ουσιαστικά σε κάθε βήμα έχουμε διαφορετικό πρόβλημα το οποίο πρέπει να επιλύσουμε. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα αυτής της πειραματικής αξιολόγησης.

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 87             | 90976           | 45833     | 12,947          |
| AC3        | 87             | 90976           | 45833     | 16,044          |
| AC3rm      | 87             | 90976           | 45833     | 17,986          |
| AC3bit+rm  | 87             | 65989           | 33338     | 12,760          |
| FC         | 86             | 81121           | 40874     | 12,998          |

Πίνακας 5.19 Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Satellite02 με Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 41             | 8878            | 4629      | 1,059           |
| AC3        | 41             | 8878            | 4629      | 1,147           |
| AC3rm      | 41             | 8878            | 4629      | 1,097           |
| AC3bit+rm  | 40             | 7158            | 3755      | 0,934           |
| FC         | 44             | 11076           | 5766      | 1,145           |

Πίνακας 5.20. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Storage04 με Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 65             | 3215475         | 1609090   | 1709,616        |
| AC3        | 65             | 3215475         | 1609090   | 1733,773        |
| AC3rm      | 65             | 3215475         | 1609090   | 2049,225        |
| AC3bit+rm  | 62             | 2334298         | 1168231   | 1424,463        |
| FC         | 63             | 1836401         | 919015    | 844,405         |

Πίνακας 5.21. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Elev3 με Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 31             | 52427           | 26426     | 4,281           |
| AC3        | 31             | 52427           | 26426     | 4,571           |
| AC3rm      | 31             | 52427           | 26426     | 4,434           |
| AC3bit+rm  | 32             | 120184          | 60322     | 10,484          |
| FC         | 30             | 91091           | 45736     | 6,912           |

Πίνακας 5.22. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog07 με Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 49             | 38915           | 19836     | 6,229           |
| AC3        | 49             | 38915           | 19836     | 6,555           |
| AC3rm      | 49             | 38915           | 19836     | 6,396           |
| AC3bit+rm  | 47             | 32408           | 16579     | 5,106           |
| FC         | 44             | 60500           | 30589     | 8,222           |

Πίνακας 5.23. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Depots02 με Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 59             | 326893          | 163813    | 15,510          |
| AC3        | 59             | 326893          | 163813    | 16,189          |
| AC3rm      | 59             | 326893          | 163813    | 15,517          |
| AC3bit+rm  | 60             | 149164          | 74970     | 7,179           |
| FC         | 62             | 6787280         | 3394122   | 270,134         |

Πίνακας 5.24. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog02 με Geometrical Restart

Εδώ τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, καθώς σε ορισμένα προβλήματα υπάρχουν αλγόριθμοι που μας δίνουν σημαντικά καλύτερους χρόνους αναζήτησης τόσο από τους χρόνους που παίρνουμε με τις προκαθορισμένες επιλογές, όσο και από αυτούς που παίρνουμε με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch (π.χ. αλγόριθμος FC στο πρόβλημα Elev3, αλγόριθμος AC3bit+rm στα προβλήματα Satellite02 και DriverLog02).

### 5.5 Χρόνοι εκτέλεσης με την προκαθορισμένη στρατηγική αναζήτησης και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart

Για τη συγκεκριμένη πειραματική αξιολόγηση, θέσαμε ως base το 50, ως grow το 2 και ως limit το 2000 και πήραμε τα πιο κάτω αποτελέσματα.

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 7704           | 146730          | 89858     | 33,295          |
| AC3        | 7704           | 146730          | 89858     | 42,562          |
| AC3rm      | 7704           | 146730          | 89858     | 41,564          |
| AC3bit+rm  | 7704           | 144349          | 88767     | 42,344          |
| FC         | 7520           | 146745          | 89658     | 34,361          |

Πίνακας 5.25 Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Satellite02 με Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 2457           | 33311           | 22458     | 4,651           |
| AC3        | 2457           | 33311           | 22458     | 4,944           |
| AC3rm      | 2457           | 33311           | 22458     | 4,613           |
| AC3bit+rm  | 2385           | 36465           | 23715     | 4,856           |
| FC         | 3576           | 51072           | 34082     | 6,364           |

Πίνακας 5.26. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Storage04 με Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 6522           | 1751535         | 893573    | 996,405         |
| AC3        | 6522           | 1751535         | 893573    | 989,892         |
| AC3rm      | 6522           | 1751535         | 893573    | 1162,727        |
| AC3bit+rm  | 6522           | 2123004         | 1079311   | 1327,107        |
| FC         | 7051           | 31546250        | 15792018  | 15674,946       |

Πίνακας 5.27. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Elev3 με Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 2260           | 32826           | 21410     | 4,473           |
| AC3        | 2260           | 32826           | 21410     | 4,836           |
| AC3rm      | 2260           | 32826           | 21410     | 4,668           |
| AC3bit+rm  | 1538           | 21433           | 14239     | 3,541           |
| FC         | 4012           | 422693          | 220857    | 35,540          |

Πίνακας 5.28. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog07 με Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 2841           | 48851           | 31402     | 14,803          |
| AC3        | 2841           | 48851           | 31402     | 15,527          |
| AC3rm      | 2841           | 48851           | 31402     | 15,539          |
| AC3bit+rm  | 2585           | 43863           | 28261     | 12,311          |
| FC         | 3226           | 62565           | 39892     | 14,659          |

Πίνακας 5.29. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Depots02 με Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 4794           | 1240630         | 631100    | 58,158          |
| AC3        | 4794           | 1240630         | 631100    | 63,696          |
| AC3rm      | 4794           | 1240630         | 631100    | 61,498          |
| AC3bit+rm  | 6542           | 576320          | 302937    | 35,257          |
| FC         | 9027           | 287303          | 164533    | 17,086          |

Πίνακας 5.30. Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog02 με Luby Restart

Ούτε και με αυτά τα αποτελέσματα μπορούμε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα, καθώς υπάρχουν αλγόριθμοι οι οποίοι μας δίνουν καλύτερους χρόνους συγκριτικά με τις προκαθορισμένες επιλογές (π.χ. αλγόριθμος AC3 στο Elev3) ενώ για το ίδιο πρόβλημα υπάρχουν αλγόριθμοι που μας δίνουν αρκετά πιο αργούς χρόνους

(π.χ. αλγόριθμος FC στο Elev3). Συγκριτικά τώρα με τη στρατηγική Geometrical Restart, τα αποτελέσματά μας ήταν πιο συνεπή· το Geometrical Restart δίνει καλύτερους χρόνους εκτέλεσης στα περισσότερα προβλήματα (εκτός από το Elev2 το οποίο δεν παρουσιάζεται εδώ).

Στις επόμενες ενότητες που ακολουθούν μελετήσαμε συνδυασμούς των στρατηγικών αναζήτησης και στρατηγικών επανεκκίνησης.

## 5.6 Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τους χρόνους αναζήτησης που πήραμε λύνοντας τα προβλήματα χρησιμοποιώντας τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.7.1.1 πιο πάνω, σε συνδυασμό με τη στρατηγική επανεκκίνησης Geometrical Restart. Οι παράμετροι της γεωμετρικής επανεκκίνησης (βάση, γεωμετρικός παράγοντας και τελικό όριο) που χρησιμοποιήσαμε για αυτή την αξιολόγηση είναι οι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιήσαμε στην ενότητα 5.4 παραπάνω. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 85             | 83874           | 42274     | 17,844          |
| AC3        | 85             | 83874           | 42274     | 19,406          |
| AC3rm      | 85             | 83874           | 42274     | 19,626          |
| AC3bit+rm  | 84             | 82922           | 41787     | 17,288          |
| FC         | 81             | 66722           | 33659     | 12,153          |

Πίνακας 5.31 – Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Satellite02 με intVarSearch και Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 37             | 4511            | 2417      | 0,761           |
| AC3        | 37             | 4511            | 2417      | 0,818           |
| AC3rm      | 37             | 4511            | 2417      | 0,776           |
| AC3bit+rm  | 37             | 3581            | 1958      | 0,607           |
| FC         | 45             | 9701            | 5106      | 1,078           |

Πίνακας 5.32

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Storage04 με intVarSearch και Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 67             | 7374342         | 3688585   | 3163,806        |
| AC3        | 67             | 7374342         | 3688585   | 3812,186        |
| AC3rm      | 67             | 7374342         | 3688585   | 3922,551        |
| AC3bit+rm  | 63             | 1488731         | 745608    | 837,165         |
| FC         | 61             | 1027098         | 514463    | 437,560         |

Πίνακας 5.33

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Elev3 με intVarSearch και Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 30             | 50614           | 25529     | 4,089           |
| AC3        | 30             | 50614           | 25529     | 4,262           |
| AC3rm      | 30             | 50614           | 25529     | 4,131           |
| AC3bit+rm  | 30             | 56318           | 28355     | 4,810           |
| FC         | 28             | 32889           | 16615     | 2,943           |

Πίνακας 5.34 – Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog07 με intVarSearch και Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 47             | 34982           | 17915     | 5,337           |
| AC3        | 47             | 34982           | 17915     | 5,570           |
| AC3rm      | 47             | 34982           | 17915     | 5,569           |
| AC3bit+rm  | 47             | 34148           | 17523     | 5,082           |
| FC         | 44             | 33598           | 17137     | 5,116           |

Πίνακας 5.35

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Depots02 με intVarSearch και Geometrical Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 67             | 246639          | 123755    | 10,661          |
| AC3        | 67             | 246639          | 123755    | 10,724          |
| AC3rm      | 67             | 246639          | 123755    | 10,665          |
| AC3bit+rm  | 59             | 91258           | 45985     | 4,811           |
| FC         | 57             | 265926          | 133341    | 12,320          |

Πίνακας 5.36 – Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog02 με intVarSearch και Geometrical Restart

Εδώ παρατηρούμε ότι ο συνδυασμός των δύο αυτών στρατηγικών μας δίνει στα περισσότερα προβλήματα (εκτός από τα προβλήματα Elev) χρόνους παρόμοιους με αυτούς που παίρνουμε όταν χρησιμοποιούμε μόνο τη στρατηγική Geometrical Restart. Παράλληλα, συγκριτικά με τη χρήση μόνο της στρατηγικής αναζήτησης intVarSearch, σε αρκετά προβλήματα μας δίνει παρόμοιους χρόνους, ενώ σε ορισμένα (π.χ. Satellite02) μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

## 5.7 Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch και με τη στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart

Ακολουθώντας, ελέγξαμε τους χρόνους εκτέλεσης για τα προβλήματα αυτά χρησιμοποιώντας τη στρατηγική αναζήτησης intVarSearch σε συνδυασμό με τη στρατηγική επανεκκίνησης Luby Restart. Οι παράμετροι της στρατηγικής επανεκκίνησης είναι οι ίδιοι που δόθηκαν στην ενότητα 5.5 πιο πάνω. Τα αποτελέσματα που πήραμε, φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 9193           | 174708          | 107512    | 48,663          |
| AC3        | 9193           | 174708          | 107512    | 51,780          |
| AC3rm      | 9193           | 174708          | 107512    | 52,017          |
| AC3bit+rm  | 8922           | 172030          | 105551    | 48,896          |
| FC         | 8165           | 154559          | 94724     | 38,066          |

Πίνακας 5.37

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Satellite02 με intVarSearch και Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 2790           | 38912           | 26306     | 5,381           |
| AC3        | 2790           | 38912           | 26306     | 5,753           |
| AC3rm      | 2790           | 38912           | 26306     | 5,633           |
| AC3bit+rm  | 3194           | 46816           | 31024     | 6,222           |
| FC         | 3302           | 50226           | 33343     | 5,693           |

Πίνακας 5.38

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Storage04 με intVarSearch και Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 6537           | 22121360        | 11078883  | 10374,220       |
| AC3        | 6537           | 22121360        | 11078883  | 10847,898       |
| AC3rm      | 6537           | 22121360        | 11078883  | 11941,038       |
| AC3bit+rm  | 6537           | 922527          | 479158    | 573,238         |
| FC         | 6540           | 4608203         | 2321327   | 1995,211        |

Πίνακας 5.39

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Elev3 με intVarSearch και Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 4013           | 58875           | 38853     | 8,623           |
| AC3        | 4013           | 58875           | 38853     | 9,042           |
| AC3rm      | 4013           | 58875           | 38853     | 8,795           |
| AC3bit+rm  | 1800           | 25163           | 16816     | 4,012           |
| FC         | 2202           | 31662           | 20792     | 4,641           |

Πίνακας 5.40

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog07 με intVarSearch και Luby Restart



| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 3158           | 52357           | 33892     | 16,256          |
| AC3        | 3158           | 52357           | 33892     | 17,500          |
| AC3rm      | 3158           | 52357           | 33892     | 16,969          |
| AC3bit+rm  | 2646           | 45638           | 30078     | 13,618          |
| FC         | 2690           | 52506           | 33215     | 13,005          |

Πίνακας 5.41

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος Depots02 με intVarSearch και Luby Restart

| Αλγόριθμος | Επανεκκινήσεις | Οπισθοδρομήσεις | Αποτυχίες | Χρόνος(seconds) |
|------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|
| AC2001     | 6573           | 167152          | 98382     | 13,630          |
| AC3        | 6573           | 167152          | 98382     | 14,722          |
| AC3rm      | 6573           | 167152          | 98382     | 14,166          |
| AC3bit+rm  | 6605           | 320388          | 175530    | 20,931          |
| FC         | 7045           | 329454          | 181194    | 18,569          |

Πίνακας 5.42

Χρόνοι επίλυσης του προβλήματος DriverLog02 με intVarSearch και Luby Restart

Ο συνδυασμός αυτός και πάλι δεν μας οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα, καθώς σε ορισμένα προβλήματα παρατηρούμε βελτίωση του χρόνου εκτέλεσης ενώ σε κάποια άλλα ο χρόνος χειροτερεύει.

## 5.8 Χρόνοι εκτέλεσης με τη στρατηγική αναζήτησης activityBasedSearch

Σε όλα τα πειράματα στα οποία η στρατηγική αναζήτησης ήταν η activityBasedSearch, οι χρόνοι επίλυσης του προβλήματος είναι κατά πολύ μεγαλύτεροι από τους χρόνους που παίρνουμε είτε με τις προκαθορισμένες επιλογές, είτε με οποιονδήποτε άλλο συνδυασμό επιλογών. Χαρακτηριστικά, το πρόβλημα Satellite02, που λύνεται σε περίπου 20 δευτερόλεπτα με τις προκαθορισμένες επιλογές, δεν λύθηκε στο χρονικό όριο των τεσσάρων ωρών που είχαμε θέσει. Επιπλέον, με τη στρατηγική αναζήτησης αυτή, το πρόβλημα επανεκκινά παρόλο που δεν έχουμε ορίσει καμία στρατηγική επανεκκίνησης.

## Κεφάλαιο 6

### Βελτιώσεις Βασικού Μοντέλου

---

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 6.1 Εισαγωγή                 | 58 |
| 6.2 Προσέγγιση μήκους πλάνου | 60 |
| 6.3 Περισσότερη πληροφόρηση  | 63 |

---

#### 6.1 Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση των προβλημάτων προγραμματισμού δράσης σε προβλήματα ικανοποίησης περιορισμών και λύση τους με τους αντίστοιχους επιλυτές (π.χ. Choco) παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι, σε αντίθεση με τους επιλυτές προβλημάτων προγραμματισμού δράσης (π.χ. LAMA), επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση δράσεων, εφόσον η μία δεν επηρεάζει την άλλη, δίνοντάς μας έτσι πάντοτε πλάνο με βέλτιστο μέγεθος.

Ας δούμε ένα απλό παράδειγμα από τον «Κόσμο των Κύβων». Έστω ότι η αρχική και η τελική κατάσταση του προβλήματος είναι οι εικόνες 6.1(α) και 6.1(β) πιο κάτω:



Εικόνα 6.1 Παράδειγμα προβλήματος στον «Κόσμο των Κύβων»

Σε ένα επιλυτή προβλημάτων προγραμματισμού δράσης, το μήκος του πλάνου θα ήταν πάντοτε ίσο με τέσσερα. Πιο κάτω φαίνεται μια λύση που δίνει ο επιλυτής LAMA.

1. (move-to-table d c)
2. (move c table d)
3. (move-to-table b a)
4. (move a table b)

Στην παραπάνω λύση, παρατηρούμε ότι οι δράσεις 1 και 3 είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα. Όμοια και οι δράσεις 2 και 4. Στους επιλυτές προβλημάτων προγραμματισμού δράσης επιτρέπεται η εκτέλεση μόνο μίας δράσης ανά χρονική στιγμή με αποτέλεσμα να μας δίνει πλάνο με μήκος 4. Αντίθετα, ο περιορισμός αυτός δεν ισχύει στα Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών όπως φαίνεται στη λύση που μας δίνει η Choco πιο κάτω (εμφανίζονται μόνο οι αναθέσεις τιμών στις μεταβλητές που αφορούν τη λύση):

1. move-to-table b a\_t0 = 1
2. move-to-table d c\_t0 = 1
3. move a table b\_t1 = 1
4. move c table d\_t1 = 1

Εδώ παρατηρούμε ότι η δράση που μετακινεί τον κύβο B από τον A στο τραπέζι και η δράση που μετακινεί τον D από τον C στο τραπέζι γίνονται και οι δύο τη χρονική στιγμή t0. Όμοια και οι δράσεις που τοποθετούν τους κύβους A και C από το τραπέζι πάνω στους B και D αντίστοιχα, εκτελούνται κατά τη χρονική στιγμή t1, δίνοντάς μας έτσι ένα πλάνο λύσης με μήκος δύο.

Παρόλο που η μοντελοποίηση σε Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών μας δίνει αυτή τη δυνατότητα, εντούτοις παρουσιάζει ένα πολύ σοβαρό μειονέκτημα: προσπαθεί να δώσει λύση στο πρόβλημα (να αναθέσει δηλαδή τιμή σε όλες τις μεταβλητές) ελέγχοντας σειριακά κατά πόσον υπάρχει λύση με μήκος πλάνου 1 αρχικά, στη συνέχεια με μήκος πλάνου 2 κ.ο.κ. Η αύξηση όμως του μήκους του πλάνου κατά ένα βήμα, οδηγεί και σε αύξηση των μεταβλητών και των περιορισμών με αποτέλεσμα η εύρεση λύσης (ή η μη εύρεση στην περίπτωσή μας) να γίνεται πιο αργή σε κάθε βήμα. Ας υποθέσουμε για παράδειγμα ότι ένα πρόβλημα λύνεται σε 10 βήματα με παράλληλη

εκτέλεση δράσεων. Η μοντελοποίηση του προβλήματος αυτού σε Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών όπως την περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4, θα δημιουργήσει 9 Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών τα οποία δεν είναι συνεπές (δεν έχουν δηλαδή λύση) προτού φτάσει σε λύση, αναλώνοντας υπολογιστικό χρόνο. Από την άλλη όμως, η πληροφορία που μας δίνει η μοντελοποίηση των ασυνεπών προβλημάτων είναι απαραίτητη για την εξεύρεση λύσης. Συγκεκριμένα, κάθε ασυνεπές πρόβλημα, μας πληροφορεί ότι δεν υπάρχει λύση με το συγκεκριμένο μήκος το οποίο μοντελοποιούμε και άρα θα πρέπει να ψάξουμε για λύση με μεγαλύτερο μήκος. Όσο όμως αυξάνουμε το μήκος το οποίο μελετούμε, τόσο αυξάνεται ο χρόνος ο οποίος χρειάζεται για να πάρουμε την πληροφορία ότι το πρόβλημα είναι ασυνεπές. Επομένως, η πρόκληση είναι να βρούμε ένα τρόπο ο οποίος θα μας δίνει την πληροφορία ότι ένα πρόβλημα συγκεκριμένου μήκους είναι ασυνεπές σε λιγότερο χρόνο.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα προτείνουμε τρόπους με τους οποίους μπορούμε να πάρουμε αυτή την πληροφορία.

## **6.2 Προσέγγιση μήκους πλάνου**

Ιδανικά, για τη λύση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης με τεχνικές Ικανοποίησης Περιορισμών, θα έπρεπε να γνωρίζουμε το μήκος του πλάνου έτσι ώστε να μην μοντελοποιούμε ασυνεπή προβλήματα. Στην πράξη όμως αυτό δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων. Αυτή η ελλιπής πληροφόρηση που έχουμε για το πρόβλημα, μας κοστίζει σε χρόνο, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Ένας τρόπος για να πάρουμε αυτή την πληροφορία σε πολύ λιγότερο χρόνο, είναι να χαλαρώσουμε το πρόβλημα (να έχουμε δηλαδή λιγότερους περιορισμούς). Για να το πετύχουμε αυτό, αγνοούμε κάποιες μεταβλητές. Συγκεκριμένα, προσπαθούμε να βρούμε το πλάνο εκείνο το οποίο θα μας οδηγήσει στην τελική κατάσταση, αλλά στην πορεία θα δίνει τιμές (θα κάνει δηλαδή label) μόνο σε μία από τις μεταβλητές, ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή από το πεδίο ορισμού τους. Με άλλα λόγια, ψάχνουμε ποιες τιμές θα πάρει εκείνη και μόνο η μεταβλητή μέχρι να φτάσουμε από την αρχική στην τελική κατάσταση. Με τον τρόπο αυτό, αγνοούμε όλους τους περιορισμούς που δεν έχουν να κάνουν με τη μεταβλητή που κάνουμε label.

Το πλάνο αυτό, από το οποίο μας ενδιαφέρει μόνο το μήκος του, θα είναι το πολύ ίσο με το βέλτιστο πλάνο και αυτό γιατί θα μπορούν να εκτελεστούν και δράσεις οι οποίες, λόγω των περιορισμών στις τιμές που μπορούν να πάρουν οι άλλες μεταβλητές, δεν θα μπορούσαν να εκτελεστούν. Παράλληλα, το πλάνο αυτό δεν μπορεί να έχει μέγεθος μεγαλύτερο από το βέλτιστο, αφού οι περιορισμοί που διέπουν τη μεταβλητή αυτή θα υπάρχουν και στο κανονικό πρόβλημα. Άρα, με άλλα λόγια, το πλάνο το οποίο παίρνουμε με αυτό τον τρόπο μας πληροφορεί ότι το κανονικό πρόβλημα δεν μπορεί να λυθεί σε λιγότερα βήματα από το μήκος το οποίο μας δίνει το πλάνο αυτό. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η πληροφόρηση αυτή μας δίνεται σε πολύ λιγότερο χρόνο από αυτόν που θα μας έδινε το κανονικό πρόβλημα, αφού θα γίνει μόνο μια μερική ανάθεση τιμών.

Όμως, αφού η κάθε μεταβλητή διέπεται από διαφορετικούς περιορισμούς, θα μας δώσει διαφορετικό πλάνο, όταν επιλεγεί για labeling. Έτσι, επιλύουμε το «χαλαρό» αυτό πρόβλημα επιλέγοντας κάθε φορά διαφορετική μεταβλητή για να γίνει label και καταγράφουμε σε ένα αρχείο κειμένου το μήκος πλάνου που μας δίνει η κάθε μία από τις μεταβλητές αυτές. Για να ελέγξουμε κατά πόσο η προσέγγιση αυτή είναι κοντά στο πραγματικό μήκος, χρησιμοποιήσαμε προβλήματα των οποίων το μήκος τους είναι γνωστό.

Ακολουθώντας, πήραμε το αρχείο κειμένου και αφού το μελετήσαμε, παρατηρήσαμε ότι σε κάποια προβλήματα υπάρχουν μεταβλητές οι οποίες μας δίνουν πολύ καλή πληροφόρηση σχετικά με το πρόβλημα παρά κάποιες άλλες. Στον πίνακα 6.1 πιο κάτω φαίνεται η καλύτερη προσέγγιση για κάθε πρόβλημα (σ.σ. όπου υπάρχει το σύμβολο > στο μήκος του πλάνου, το πρόγραμμα δεν έφτασε σε λύση μετά την πάροδο δύο ωρών).

Παρατηρώντας τον πίνακα, βλέπουμε ότι σε ορισμένα προβλήματα η προσέγγιση που παίρνουμε είναι ακριβώς το μήκος του πλάνου (π.χ. depots1, rovers9, visit4f κ.ά.), ενώ σε κάποια άλλα η προσέγγιση δεν είναι και τόσο καλή (π.χ. elev6, pipes9, store11 κ.ά.).

| Πρόβλημα   | Μήκος λύσης | Καλύτερη προσέγγιση |
|------------|-------------|---------------------|
| drive1     | 6           | 4                   |
| drive2     | 9           | 5                   |
| drive13    | 12          | 7                   |
| depots1    | 5           | 5                   |
| depots2    | 8           | 5                   |
| depots3    | 12          | 8                   |
| depots7    | 10          | 6                   |
| elev1      | 8           | 6                   |
| elev2      | 11          | 5                   |
| elev3      | 7           | 4                   |
| elev4      | 11          | 5                   |
| elev5      | 9           | 5                   |
| elev6      | 14          | 6                   |
| pipes2     | 10          | 4                   |
| pipes3     | 6           | 4                   |
| pipes8     | 7           | 3                   |
| pipes9     | 11          | 5                   |
| rovers5    | 5           | 5                   |
| rovers6    | 9           | 9                   |
| rovers9    | 10          | 10                  |
| store5     | 6           | 4                   |
| store8     | 8           | 4                   |
| store11    | 11          | 3                   |
| store12    | 9           | 3                   |
| transport2 | 11          | 3                   |
| transport3 | 14          | 4                   |
| visit4h    | 11          | 11                  |
| visit3f    | 8           | 8                   |
| visit4f    | 15          | 15                  |
| trucks1    | 11          | 5                   |
| trucks2    | 14          | 5                   |
| Satel4     | 10          | 7                   |
| Satel6     | 8           | 6                   |
| Satel12    | 14          | >8                  |
| Satel13    | 13          | 4                   |
| Freecell2  | 8           | 5                   |
| Freecell3  | 7           | 5                   |
| Freecell4  | 13          | 5                   |
| Freecell6  | 15          | 5                   |

Πίνακας 6.1 – Αποτελέσματα πειράματος προσέγγισης μήκους πλάνου

### 6.3 Περισσότερη πληροφόρηση

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, παρατηρήσαμε ότι κάποιες μεταβλητές του προβλήματος, μας έδιναν καλύτερη πληροφόρηση σχετικά με το πρόβλημα, παρά κάποιες άλλες. Το ζητούμενο τώρα είναι να πάρουμε μια καλύτερη πληροφόρηση σχετικά με το πρόβλημα. Σκεφτήκαμε ότι αν χρησιμοποιήσουμε περισσότερες από μία μεταβλητές για να αναθέσουμε τιμές, το πρόβλημα δεν θα ήταν τόσο «χαλαρό» και έτσι θα παίρναμε καλύτερη πληροφόρηση σε επιπλέον όμως χρόνο. Για να επιλέξουμε όμως ποιες άλλες μεταβλητές θα γίνουν label, πρέπει να βρούμε τι χαρακτηριστικά έχουν οι μεταβλητές οι οποίες μας έδωσαν την αρχική πληροφόρηση έτσι ώστε να τα χρησιμοποιήσουμε για να επιλέξουμε τις επιπλέον μεταβλητές.

Για τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών των μεταβλητών, χρησιμοποιήσαμε το αρχείο test.groups το οποίο παράγεται από τον επιλυτή προβλημάτων προγραμματισμού δράσης LAMA. Το αρχείο αυτό είναι μια αναγνώσιμη αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ των δηλώσεων της αναπαράστασης STRIPS και της κωδικοποίησης μεταβλητών/τιμών στο output.sas. Ένα παράδειγμα του αρχείου αυτού από τον «Κόσμο των Κύβων», φαίνεται πιο κάτω:

```
var0:
0: Atom on(a, table)
1: Atom on(a, a)
2: Atom on(a, b)
3: Atom on(a, c)
4: Atom on(a, d)
var1:
0: Atom on(d, d)
1: Atom on(d, c)
2: Atom on(d, b)
3: Atom on(d, a)
4: Atom on(d, table)
```

Αυτή η αναπαράσταση μας δείχνει ότι όταν η μεταβλητή  $var0 = 0$ , αυτό σημαίνει ότι ο κύβος a είναι πάνω στο τραπέζι. Όταν  $var0 = 4$  ο κύβος a είναι πάνω στον κύβο d, όταν  $var1 = 1$  ο κύβος d είναι πάνω στον κύβο c κ.ο.κ.. Παρατηρούμε ότι στο πιο πάνω παράδειγμα, οι μεταβλητές  $var0$  και  $var1$  κωδικοποιούν τη θέση των κύβων a και d αντίστοιχα.

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, αποφασίστηκε όπως επιλέξουμε και ελέγξουμε τις μεταβλητές οι οποίες κωδικοποιούν παρόμοια πράγματα με αυτή που μας έδωσε την καλύτερη πληροφόρηση. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι οι μεταβλητές που δίνουν την καλύτερη πληροφόρηση μπορεί να είναι περισσότερες από μία. Σε αυτή την περίπτωση ελέγξαμε όλες τις ομάδες όμοιων μεταβλητών.

Τα αποτελέσματα αυτής της προσέγγισης φαίνονται στον πίνακα 6.2. Στον πίνακα αυτό φαίνονται οι μεταβλητές που δίνουν την καλύτερη πληροφόρηση. Αν αυτές είναι περισσότερες από μία, τότε οι όμοιες μεταβλητές ομαδοποιούνται. Στην περίπτωση που όλες οι μεταβλητές δίνουν την ίδια προσέγγιση (π.χ. store11), τότε δημιουργήθηκαν και ελέγχθηκαν όλες οι όμοιες ομάδες.

| Πρόβλημα | Μήκος Λύσης | Μεταβλητή που γίνεται label στην καλύτερη προσέγγιση                                                                            | Προσέγγιση με την καλύτερη μεταβλητή | Όμοιες Μεταβλητές                                                                                                                                            | Προσέγγιση με labeling όλων των όμοιων μεταβλητών          |
|----------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| drive1   | 6           | var0 (θέση driver2)                                                                                                             | 4                                    | var1 (θέση driver1)                                                                                                                                          | 6                                                          |
| drive2   | 9           | var3(θέση package2),<br>var4(θέση package1)                                                                                     | 5                                    | var2 (θέση package3)                                                                                                                                         | 5                                                          |
| drive13  | 12          | var5 (θέση package2),<br>Var7 (θέση package4)                                                                                   | 7                                    | Var2(θέση package3),<br>var3(θέση package6),<br>var4(θέση package5),<br>var6(θέση package1)                                                                  | 7                                                          |
| depots1  | 5           | var0(θέση crate1),<br>var1(θέση crate0)                                                                                         | 5                                    |                                                                                                                                                              | 5                                                          |
| depots2  | 8           | Group 1:<br>var1(θέση crate1 στην αποθήκη),<br>var2(θέση crate2),<br>var3(θέση crate0)<br><br>Group2:<br>var7(τοποθεσία crate1) | 5                                    | Similar to Group1:<br>Var0(θέση crate3 στην αποθήκη)<br><br>Similar to var7:<br>var4(τοποθεσία crate3),<br>var5(τοποθεσία crate0),<br>var6(τοποθεσία crate2) | Length with (group1)<br>8<br><br>Length with (group2)<br>6 |
| depots3  | 12          | var4(θέση crate2)                                                                                                               | 8                                    | var0(θέση crate5),<br>var1(θέση crate3),<br>var2(θέση crate4),<br>var3(θέση crate1),<br>var5(θέση crate0)                                                    | > 9                                                        |



|         |    |                                                                                                                                                                                 |   |                                                                                                                                                                                                                                     |                                                      |
|---------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| depots7 | 10 | var2(θέση crate4)                                                                                                                                                               | 6 | var0(θέση crate5),<br>var1(θέση crate3),<br>var3(θέση crate1),<br>var4(θέση crate2),<br>var5(θέση crate0)                                                                                                                           | > 7                                                  |
| elev1   | 8  | var1(κατάσταση passenger p1)                                                                                                                                                    | 6 | var0(κατάσταση passenger p3),<br>var2(κατάσταση passenger p2),<br>var3(κατάσταση passenger p0)                                                                                                                                      | 8                                                    |
| elev2   | 11 | Group1:<br>var0(κατάσταση passenger p3),<br>var4(κατάσταση passenger p0)<br><br>Group2:<br>var6(θέση lift slow1-0)                                                              | 5 | similar to group1:<br>var1(κατάσταση passenger p1),<br>var2(κατάσταση passenger p4),<br>var3(κατάσταση passenger p2)<br><br>Similar to group2:<br>var5(θέση lift fast1),<br>var7(θέση lift slow0-0),<br>var8(θέση lift fast0)       | Length with group1 > 7<br><br>Length with group2 5   |
| elev3   | 7  | var3(κατάσταση passenger p4)                                                                                                                                                    | 4 | var0(κατάσταση passenger p5),<br>var1(κατάσταση passenger p3),<br>var2(κατάσταση passenger p1),<br>var4(κατάσταση passenger p2),<br>var5(κατάσταση passenger p0)                                                                    | > 6                                                  |
| elev4   | 11 | Group1:<br>var2(κατάσταση passenger p1),<br>var3(κατάσταση passenger p6),<br>var5(κατάσταση passenger p2)<br><br>Group2:<br>var8(θέση lift slow1-0),<br>var9(θέση lift slow0-0) | 5 | similar to Group1:<br>var0(κατάσταση passenger p5),<br>var1(κατάσταση passenger p3),<br>var4(κατάσταση passenger p4),<br>var6(κατάσταση passenger p0)<br><br>Similar to Group2:<br>var7(θέση lift fast1),<br>var10(θέση lift fast0) | Length with group1 > 6<br><br>Length with group2 > 5 |
| elev5   | 9  | var4(κατάσταση passenger p4),<br>Var5(κατάσταση passenger p2)                                                                                                                   | 5 | var0(κατάσταση passenger p5),<br>var1(κατάσταση passenger p3),<br>var2(κατάσταση passenger p1),<br>var3(κατάσταση passenger p6),<br>var6(κατάσταση passenger p0),<br>var7(κατάσταση passenger p7)                                   | > 6                                                  |

|         |    |                                                                                                |    |                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                              |
|---------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| elev6   | 14 | var2(κατάσταση passenger p1),<br>var4(κατάσταση passenger p4),<br>var7(κατάσταση passenger p8) | 6  | var0(κατάσταση passenger p5),<br>var1(κατάσταση passenger p3),<br>var3(κατάσταση passenger p6),<br>var5(κατάσταση passenger p2),<br>var6(κατάσταση passenger p0),<br>var8(κατάσταση passenger p7)                                                      | > 7                                                          |
| pipes2  | 10 | var0 (pipe s12)                                                                                | 4  | var1 (pipe s13)                                                                                                                                                                                                                                        | > 9                                                          |
| pipes3  | 6  | Group1:<br>var0 (pipe s12)<br><br>Group2:<br>var33(pipe s12 last on batch b6)                  | 4  | similar to group1:<br>var1 (pipe s13)<br><br>Similar to group2:<br>var31, var32, var34,<br>var35, var36, var37,<br>var38, var39, var40,<br>var41, var42, var43,<br>var44, var45, var46                                                                 | length with (group1)<br>5<br><br>Length with (group2)<br>> 4 |
| pipes8  | 7  | Group1:<br>var0(pipe s12)<br><br>Group2:<br>var63(pipe s12 last on batch b1)                   | 3  | similar to group1:<br>var1(pipe s13)<br><br>Similar to group2:<br>var41, var42,<br>var43, var44, var45,<br>var46, var47, var48,<br>var49, var50, var51,<br>var52, var53, var54,<br>var55, var56, var57,<br>var58, var59, var60,<br>var61, var62, var64 | Length with (group1) > 5<br><br>Length with (group2)<br>3    |
| pipes9  | 11 | var0(pipe s12)                                                                                 | 5  | var1(pipe s13)                                                                                                                                                                                                                                         | > 6                                                          |
| rovers5 | 5  | Group1:<br>var0 (θέση rover1)<br><br>Group2:<br>var4(soil waypoint2),<br>var5(soil waypoint1)  | 5  | similar to group1:<br>var1(θέση rover0)<br><br>Similar to group2:<br>var7(soil waypoint3)                                                                                                                                                              | length with group1:<br>5<br><br>Length with group2: 5        |
| rovers6 | 9  | var1(θέση rover1)                                                                              | 9  | var0(θέση rover0)                                                                                                                                                                                                                                      | 9                                                            |
| rovers9 | 10 | var1(θέση rover1)                                                                              | 10 | var0(θέση rover2),<br>var2(θέση rover0),<br>var3(θέση rover3)                                                                                                                                                                                          | > 6                                                          |
| store5  | 6  | var0(κατάσταση crate0),<br>var1(κατάσταση crate1)                                              | 4  |                                                                                                                                                                                                                                                        | 5                                                            |
| store8  | 8  | var0(κατάσταση crate2),<br>var1(κατάσταση crate0),<br>var2(κατάσταση crate1)                   | 4  |                                                                                                                                                                                                                                                        | 6                                                            |

|         |    |                                       |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------|----|---------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| store11 | 11 | all                                   | 3 | <p>Similar group 1<br/>var0(θέση crate3),<br/>var1(θέση crate2),<br/>var2(θέση crate0),<br/>var3(θέση crate1)</p> <p>Similar group 2<br/>var4(θέση hoist0),<br/>var5(θέση hoist1)</p> <p>Similar group 3<br/>(κιβώτιο μέσα σε<br/>αποθήκη)<br/>(var6, var11, var17,<br/>var20)</p> <p>Similar group 4<br/>(clear container)<br/>(var7, var8, var14,<br/>var25)</p> <p>Similar group 5<br/>(κιβώτιο σε container)<br/>(var9, var13, var18,<br/>var26)</p> <p>Similar group 6<br/>(clear αποθήκη)<br/>(var10, var15, var16,<br/>var19, var22, var23,<br/>var24, var27)</p> <p>Similar group 7<br/>(available hoist)<br/>(var12, var21)</p> | <p>Length with<br/>group1: 8</p> <p>Length with<br/>group2: 3</p> <p>Length with<br/>group3: 3</p> <p>Length with<br/>group4: 3</p> <p>Length with<br/>group5: 3</p> <p>Length with<br/>group6: 3</p> <p>Length with<br/>group7: 3</p> |
| store12 | 9  | All<br>(όμοιες ομάδες<br>με store 11) | 3 | <p>Similar group 1 (var0,<br/>var1,var2,var3)</p> <p>Similar group2 (var4,<br/>var5, var6)</p> <p>Similar group3 (var7,<br/>var21, var24, var28)</p> <p>Similar group4 (var8,<br/>var11, var14)</p> <p>Similar group5 (var9,<br/>var17, var18, var26)</p> <p>Similar group6<br/>(var10, var12, var13,<br/>var16, var20, var22,<br/>var25, var29)</p> <p>Similar group7<br/>(var15, var19, var23,<br/>var27)</p>                                                                                                                                                                                                                          | <p>Length with<br/>group1: 6</p> <p>Length with<br/>group2: 3</p> <p>Length with<br/>group3: 3</p> <p>Length with<br/>group4: 3</p> <p>Length with<br/>group5: 3</p> <p>Length with<br/>group6: 3</p> <p>Length with<br/>group7: 3</p> |

|            |    |                                                                                                                       |    |                                                                                                                                                                                         |                                                                                              |
|------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| transport2 | 11 | all                                                                                                                   | 3  | Similar group1<br>(package location)<br>(var0, var1, var2,<br>var3)<br><br>Similar group2<br>(truck location)<br>(var4, var5)<br><br>Similar group3<br>(truck capacity)<br>(var6, var7) | Length with<br>group1: 9<br><br>Length with<br>group 2: > 8<br><br>Length with<br>group 3: 3 |
| transport3 | 14 | var4(location<br>package 3)                                                                                           | 4  | var0(location pack 4),<br>var1(location pack 1),<br>var2(location pack 5),<br>var3(location pack 2),<br>var5(location pack 6)                                                           | > 7                                                                                          |
| visit4h    | 11 | var0 (robot<br>location)                                                                                              | 11 |                                                                                                                                                                                         |                                                                                              |
| visit3f    | 8  | var0(robot<br>location)                                                                                               | 8  |                                                                                                                                                                                         |                                                                                              |
| visit4f    | 15 | var0(robot<br>location)                                                                                               | 15 |                                                                                                                                                                                         |                                                                                              |
| trucks1    | 11 | var1, var2,var3<br>(packs location)                                                                                   | 5  |                                                                                                                                                                                         | 11                                                                                           |
| trucks2    | 14 | var1, var2, var3,<br>var4<br>(packs location)                                                                         | 5  |                                                                                                                                                                                         | > 13                                                                                         |
| Satel4     | 10 | var0<br>(point satellite1)                                                                                            | 7  | var1<br>(point satellite0)                                                                                                                                                              | > 7                                                                                          |
| Satel6     | 8  | var1<br>(point satellite1)                                                                                            | 6  | var0(point satellite2),<br>var2(point satellite0)                                                                                                                                       | > 5                                                                                          |
| Satel12    | 14 | var2<br>(point satellite1)                                                                                            | >8 | var0(point satellite2),<br>var1(point satellite4),<br>var3(point satellite0),<br>var4(point satellite3)                                                                                 | > 4                                                                                          |
| Satel13    | 13 | var1<br>(point satellite4)                                                                                            | 4  | var0(point satellite2),<br>var2(point satellite1),<br>var3(point satellite0),<br>var4(point satellite3)                                                                                 | > 4                                                                                          |
| Freecell2  | 8  | var0<br>(location heart2)<br>var3<br>(location spade2)                                                                | 5  |                                                                                                                                                                                         | 5                                                                                            |
| Freecell3  | 7  | var6<br>(location heart3)                                                                                             | 5  | (cards location)<br>var0, var2, var3, var5,<br>var7                                                                                                                                     | > 6                                                                                          |
| Freecell4  | 13 | Group1:<br>var11(location<br>diamond4 –<br>domain 0..5)<br><br>Group2:<br>var23(location<br>spade4 –<br>domain 0...3) | 5  | similar to group1:<br>(cards location with<br>domain 0..5)<br>var12, var13, var14,<br>var15<br><br>Similar to group2:<br>(cards location with<br>domain 0..3)<br>var22                  | length with<br>group1:<br>5<br><br>Length with<br>group2:<br>5                               |

|           |    |     |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------|----|-----|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Freecell6 | 15 | all | 5 | <p>Similar group1:<br/>(cellspace)<br/>var0</p> <p>Similar group2:<br/>(colspace)<br/>var1</p> <p>Similar group3:<br/>(cards location with<br/>domain 0...6)<br/>var2, var3, var4, var5,<br/>var6, var7, var8, var9,<br/>var10, var12, var13,<br/>var15, var17, var18)</p> <p>Similar group4:<br/>(cards location with<br/>domain 0...5)<br/>(var11, var14, var16)</p> <p>Similar group5:<br/>(cards location with<br/>domain 0...5 and one<br/>option is 'none')<br/>(var19, var20, var21,<br/>var22, var23, var25)</p> <p>Similar group6:<br/>(cards location with<br/>domain 0...4)<br/>(var24)</p> <p>Similar group7:<br/>(cards location with<br/>domain 0...4 and one<br/>option is 'none')<br/>(var26, var27)</p> <p>Similar group8:<br/>(cards location with<br/>domain 0...3)<br/>(var28, var29)</p> <p>Similar group9:<br/>(card at home)<br/>(var30, var31, var32,<br/>var33)</p> <p>Similar group10:<br/>(card at bottomcol)<br/>(var34, var35, var36,<br/>var37, var38, var40,<br/>var41, var42, var43,<br/>var44, var45, var46,<br/>var47, var48, var49,<br/>var50, var51, var52,<br/>var53, var55, var56,</p> | <p>Length with<br/>group1: 5</p> <p>Length with<br/>group2: 5</p> <p>Length with<br/>group3: &gt; 6</p> <p>Length with<br/>group4: 5</p> <p>Length with<br/>group5: 5</p> <p>Length with<br/>group6: 5</p> <p>Length with<br/>group7: 5</p> <p>Length with<br/>group8: 5</p> <p>Length with<br/>group9: 5</p> <p>Length with<br/>group10: 5</p> <p>Length with<br/>group11: 5</p> |
|-----------|----|-----|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|  |  |  |  |                                                                                                 |  |
|--|--|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |  |  |  | var57, var58, var59,<br>var60, var61)<br><br>Similar group11:<br>(card clear)<br>(var39, var54) |  |
|--|--|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

Πίνακας 6.2

Από τα πιο πάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι στις πλείστες των περιπτώσεων, παίρνουμε καλύτερη πληροφόρηση από αυτή που παίρνουμε όταν κάνουμε label μόνο μία μεταβλητή, ενώ σε κάποιες άλλες η πληροφόρηση είναι ακριβώς το μήκος του πλάνου (π.χ. στα προβλήματα drive1, elev1 και trucks1). Στην περίπτωση του προβλήματος Satel12 η πληροφόρηση που παίρνουμε είναι χειρότερη, το οποίο όμως είναι αναμενόμενο καθώς ο επιλυτής, όταν προσπαθούσε να κάνει label μία μόνο μεταβλητή σταμάτησε στα 8 βήματα λόγω του ότι παρήλθε το χρονικό όριο των δύο ωρών που είχαμε θέσει. Έτσι, κάνοντας το πρόβλημα πιο περίπλοκο, το χρονικό αυτό όριο παρέρχεται σε λιγότερα βήματα.

Παρατηρούμε ακόμη ότι στην περίπτωση που όλες οι μεταβλητές μας δίνουν την ίδια πληροφόρηση ξεχωριστά (π.χ. store11, store12, transport2) παίρνουμε καλύτερη πληροφόρηση από τις ομάδες μεταβλητών που έχουν μεγαλύτερο πεδίο τιμών.

## Κεφάλαιο 7

### Συμπεράσματα

---

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 7.1 Εισαγωγή            | 71 |
| 7.2 Γενικά Συμπεράσματα | 71 |
| 7.3 Μελλοντική εργασία  | 73 |

---

#### 7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε αρχικά κάποια γενικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν τόσο μέσα από την πειραματική αξιολόγηση της μοντελοποίησης των προβλημάτων προγραμματισμού δράσης σε προβλήματα ικανοποίησης περιορισμών όσο και μέσα από τις προσπάθειες βελτιστοποίησης του χρόνου επίλυσης των προβλημάτων αυτών. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποιες εισηγήσεις για μελλοντική εργασία στο θέμα της μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης της επίλυσης προβλημάτων προγραμματισμού δράσης με τεχνικές ικανοποίησης περιορισμών.

#### 7.2. Γενικά Συμπεράσματα

Η επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης με τεχνικές ικανοποίησης περιορισμών, μας παρέχει το σημαντικότερο πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση δράσεων, δίνοντας μας έτσι πάντοτε πλάνο με βέλτιστο μήκος. Από την άλλη όμως, προβλήματα τα οποία έχουν μεγάλο μήκος πλάνου (χρειάζονται δηλαδή αρκετά βήματα για να λυθούν) δημιουργούν ένα μεγάλο αριθμό μεταβλητών και περιορισμών οι οποίοι πρέπει να ικανοποιηθούν, με αποτέλεσμα η λύση τους να είναι χρονοβόρα. Επιπλέον, το γεγονός ότι το μήκος του πλάνου δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων, αρκετός χρόνος αναλώνεται στην προσπάθεια επίλυσης ασυνεπών προβλημάτων

(προβλημάτων δηλαδή που δεν έχουν λύση). Αυτό είναι αναγκαίο κακό, καθώς χρειαζόμαστε την πληροφορία ότι το πρόβλημα δεν έχει λύση συγκεκριμένου μήκους πλάνου, έτσι ώστε να προσπαθήσουμε να το λύσουμε σε μεγαλύτερο αριθμό βημάτων.

Μέσα από την πειραματική αξιολόγηση, προέκυψε ότι η στρατηγική αναζήτησης *activityBasedSearch* δεν συστήνεται για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, καθώς όλα τα προβλήματα τα οποία μοντελοποιήθηκαν με αυτή τη στρατηγική, είχαν σημαντικά πιο αργούς χρόνους εκτέλεσης. Από την άλλη, δεν μπορούμε να εξάγουμε κάποιο βάσιμο συμπέρασμα για τη στρατηγική αναζήτησης *intVarSearch*, καθώς δεν είχαμε τα ίδια αποτελέσματα σε όλα προβλήματα τα οποία μοντελοποιήσαμε. Συγκεκριμένα, κάποια προβλήματα μας έδιναν καλύτερους χρόνους επίλυσης, ενώ κάποια άλλα χειρότερους, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το ίδιο το πρόβλημα ενδέχεται να επηρεάζει την επίδραση της στρατηγικής *intVarSearch*.

Αντίθετα, η χρήση στρατηγικών επανεκκίνησης έδωσε αρκετά θετικά αποτελέσματα στα περισσότερα προβλήματα, μειώνοντας το χρόνο εκτέλεσης, επιβεβαιώνοντας ουσιαστικά αυτό που αναφέρουν και οι Russell & Norvig (2009) ότι εμπειρικά αποδείχθηκε ότι αυτή η πρακτική βοηθά στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων[18]. Όμως, δεν είναι ξεκάθαρο ποια στρατηγική υπερισχύει, καθώς σε ορισμένα προβλήματα οι χρόνοι ήταν καλύτεροι με τη στρατηγική *Geometrical Restart* ενώ σε κάποια άλλα με τη στρατηγική του *Luby Restart*.

Τέλος, δεν προέκυψε μέσα από τα πειραματικά αποτελέσματά μας ένας αλγόριθμος διάδοσης περιορισμών ο οποίος να υπερισχύει συστηματικά των υπολοίπων (αν και ο αλγόριθμος *AC3bit+rm* παρουσιάζει λιγότερη απόκλιση). Αξιοσημείωτο όμως είναι το γεγονός ότι στο σύνολο των προβλημάτων τα οποία εξετάστηκαν (37 τον αριθμό), οι αλγόριθμοι *AC2001*, *AC3* και *AC3rm* είχαν ακριβώς τον ίδιο αριθμό αποτυχημένων αναθέσεων, οπισθοδρομήσεων και επανεκκινήσεων. Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και οι τρεις αυτοί αλγόριθμοι επιλέγουν με την ίδια σειρά τις μεταβλητές στις οποίες θα γίνει ανάθεση τιμής και ελέγχουν με την ίδια σειρά τις τιμές από το πεδίο ορισμού της.



Μέσα τώρα από τις προσπάθειες βελτιστοποίησης του χρόνου εκτέλεσης, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μπορούμε να πάρουμε μια πολύ καλή πληροφόρηση σχετικά με το μήκους του πλάνου ενός προβλήματος προγραμματισμού δράσης, με το να το μοντελοποιήσουμε σε ένα Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών και να επιλέξουμε μόνο μία από τις μεταβλητές η οποία θα γίνεται label κατά τη διάρκεια του πλάνου. Επιπλέον, μπορούμε να πάρουμε επιπρόσθετη πληροφόρηση από την αρχική αν επιλέξουμε ένα σύνολο όμοιων μεταβλητών οι οποίες θα γίνονται label κατά τη διάρκεια του πλάνου. Με τον τρόπο αυτό, περιορίζουμε το χρόνο τον οποίο χρειαζόμαστε για να πάρουμε την απάντηση ότι το πρόβλημα δεν έχει λύση με πλάνο συγκεκριμένου μήκους και άρα πρέπει να επικεντρωθούμε σε μεγαλύτερο αριθμό βημάτων.

### **7.3 Μελλοντική εργασία**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε αναφορά στον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να επιλύσουμε ένα πρόβλημα προγραμματισμού δράσης, χρησιμοποιώντας τεχνικές ικανοποίησης περιορισμών. Το πλεονέκτημα της λύσης με αυτές τις τεχνικές είναι, όπως προαναφέρθηκε, το γεγονός ότι το πλάνο που παίρνουμε με αυτές τις τεχνικές είναι πάντοτε βέλτιστο, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εκτέλεση ανεξάρτητων δράσεων και όλα τα πλάνα με μικρότερο μήκος δεν μας οδηγούν σε λύση. Επιπλέον αναφέρθηκε ότι το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι το γεγονός ότι αρκετός χρόνος αναλώνεται στην προσπάθεια εύρεσης πλάνου με μήκος μικρότερο του βέλτιστου.

Ακόμη, στο κεφάλαιο των βελτιώσεων του βασικού μοντέλου, δείξαμε ένα τρόπο με τον οποίο μπορούμε να πάρουμε μια αρχική πληροφόρηση για το μήκους του πλάνου, την οποία πληροφόρηση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως το εναρκτήριο βήμα στη μοντελοποίηση του προβλήματος για να αποφύγουμε τα άσκοπα βήματα. Στην προσπάθειά μας να πάρουμε καλύτερη πληροφόρηση, βάλαμε μαζί τις όμοιες μεταβλητές με αυτή που μας έδωσε την αρχική πληροφόρηση και προσπαθήσαμε να κάνουμε label αυτό το σύνολο μεταβλητών. Ως μελλοντική εργασία προτείνουμε να ελεγχθούν διαφορετικοί συνδυασμοί μεταβλητών. Θα μπορούσαμε για παράδειγμα αντί να πάρουμε όλες τις όμοιες μεταβλητές με αυτή που μας δίνει την καλύτερη

πληροφόρηση, να πάρουμε τις δύο μεταβλητές με τις καλύτερες προσεγγίσεις και να προσπαθήσουμε να τις κάνουμε label, ανεξάρτητα με το αν είναι όμοιες ή όχι. Ή ακόμη να πάρουμε ζεύγη όμοιων μεταβλητών, αντί το σύνολό τους σε περίπτωση που είναι περισσότερες από δύο, καθώς όσες περισσότερες μεταβλητές γίνονται label, τόσο αυξάνεται και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Ή να επιλέξουμε τις μεταβλητές που συμμετέχουν στους περισσότερους περιορισμούς. Γενικά, υπάρχουν πάρα πολλοί συνδυασμοί μεταβλητών οι οποίοι μπορούν να ελεγχθούν και εδώ προτείνονται μόνο ορισμένοι από αυτούς. Η εύρεση ενός συνδυασμού μεταβλητών, η οποία θα μας δίνει μια πολύ καλή προσέγγιση του μήκους του πλάνου, θα επιφέρει σημαντική βελτίωση στο χρόνο επίλυσης του προβλήματος προγραμματισμού δράσης με τεχνικές ικανοποίησης περιορισμών.

## Βιβλιογραφία

- [1] R.S.Aylett, G.J.Petley, P.W.H.Chung, B.Chen, J.Soutter and D.W.Edwards, “AI Planning: Solutions for Real World Problems”, In: Ellis R., Moulton M., Coenen F. (eds) Applications and Innovations in Intelligent Systems VII. Springer, London, 2000.
- [2] C. Bessiere, J.C. Régin, R. Yap and Y. Zhang, “An optimal coarse-grained arc-consistency algorithm”, Artificial Intelligence, vol. 165, pp. 165–185, 2005.
- [3] F. Boussemart, F.Hemery, C.Lecoutre and L Sais, “Boosting systematic search by weighting constraints”, Proceedings of ECAI’04, pp. 146–150, 2004.
- [4] W. Cushing, D.S.Weld, S.Kambhampati, Mausam, and K.Talamadupula, “Evaluating Temporal Planning Domains”, Proceedings of ICAPS, AAAI Press, pp. 105-112, 2007.
- [5] G. Dejong and S.Bennett, “Extending classical planning to real-world execution with machine learning”, In Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 2 (IJCAI’95), Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, pp. 1153-1159, 1995.
- [6] M. Ghallab, D. Nau, and P. Traverso, Automated Planning: Theory and Practice, 1st edition, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2004.
- [7] R.M. Haralick and G.L.Elliott, “Increasing tree search efficiency for constraint satisfaction problems”, Artificial Intelligence, vol. 14, pp. 263–313, 1980.
- [8] C. Lecoutre and F.Hemery, “A Study of Residual Supports in Arc Consistency”, 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI’07), Hyderabad, India, pp.125-130, 2007.

- [9] C. Lecoutre and J.Vion, “Enforcing Arc Consistency using Bitwise Operations”, *Constraint Programming Letters (CPL)*, vol. 2, pp. 21-35, 2008.
- [10] M. Luby, A.Sinclair and D.Zuckerman, “Optimal speedup of Las Vegas algorithms”, *Information Processing Letters*, vol. 47, pp. 173–180, 1993.
- [11] A.K. Mackworth, “Consistency in networks of relations”, *Artificial Intelligence*, vol. 8, pp. 99–118, 1977.
- [12] L. Michel and P. Van Hentenryck, “Activity-Based Search for Black-Box Constraint Programming Solvers”, In: Beldiceanu N., Jussien N., Pinson É. (eds) *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimzation Problems. CPAIOR 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol 7298. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [13] C. Prud’homme, J.G. Fages and X. Lorca, “Choco Solver Documentation, Release 4.0.5”, 2017, Article available online:  
<https://media.readthedocs.org/pdf/choco-solver/latest/choco-solver.pdf>.
- [14] M.F.Rankoooh and G.Ghassem-Sani, “New Encoding Methods for SAT-Based Temporal Planning”, *Proceedings of ICAPS, AAAI Press*, pp. 73-81, 2013.
- [15] S. Richter and M. Westphal, “The LAMA Planner: Guiding Cost-Based Anytime Planning with Landmarks”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 39, pp. 127–177, 2010.
- [16] J. Rintanen and J. Hoffmann, “An overview of recent algorithms for AI planning”, *Künstliche Intelligenz*, vol. 2, pp 5-11, 2001.
- [17] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach 2nd Ed.*, Prentice Hall, New Jersey, 2002.

- [18] S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach 3rd Ed., Prentice Hall, New Jersey, 2009.
- [19] E. Tsang, Foundations of Constraint Satisfaction, Academic Press, London, 1993.
- [20] Zacarias et al., “Planning Solutions In The Real World”, International Journal of Artificial Intelligence & Applications (IJAlA), Vol. 5, No. 3, pp. 53-65, 2014.

## Παράρτημα Α

Κώδικας μοντελοποίησης Προβλήματος Προγραμματισμού δράσης και επίλυσή του με τη χρήση της Choco.

Η κλάση Variable στην οποία αποθηκεύουμε τις πληροφορίες της μεταβλητής καθώς διαβάζουμε το αρχείο output.sas

```
/**
 * This class stores variable's name and domain size
 * during reading output.sas file
 *
 * @author Solonas Polycarpou
 */
public class Variable {
    String name;
    int domain;

    public Variable (String name, int domain) {
        this.name = name;
        this.domain = domain;
    }
}
```

Η κλάση Operator στην οποία αποθηκεύουμε τις πληροφορίες της κάθε δράσης καθώς διαβάζουμε το αρχείο output.sas

```
/**
 * This class stores operators name, conditions and effects
 * while reading output.sas file
 *
 * @author Solonas Polycarpou
 */
public class Operator {
    String name;
    int [][] conditions;
    int [][] effects;

    public Operator (String name, int [][] conditions, int [][] effects) {
        this.name = name;
        this.conditions = conditions;
        this.effects = effects;
    }
}
```

Η κλάση Planning Solver η οποία διαβάζει το αρχείο output.sas, μοντελοποιεί το πρόβλημα σε Πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών και προσπαθεί να το επιλύσει με τη χρήση της Choco.

```
/**
 *
 * This program reads output.sas file produced by LAMA planner
 * and transforms the planning problem to a Constraint
 * Satisfaction Problem and then it uses Choco Solver to solve it
 *
 * @author Solonas Polycarpou
 */

import org.chocosolver.solver.*;
import org.chocosolver.solver.constraints.extension.Tuples;
import org.chocosolver.solver.search.limits.FailCounter;
import org.chocosolver.solver.search.strategy.Search;
import org.chocosolver.solver.variables.*;
import java.io.BufferedReader;
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.FileReader;
import java.io.IOException;
import java.time.format.DateTimeFormatter;
import java.util.ArrayList;
import java.util.Scanner;

public class PlanningSolver{

    public static void main (String []args) {
        int maxSteps;
        int algo;
        String algorithm;
        int strategy;
```



```

int restartStrategy;
int noOfOperators = 0;
int noOfVars = 0;
ArrayList <ArrayList <Integer> > guiltyOp = null;
long restarts = 0;
long backtracks = 0;
long fails = 0;

Scanner stdin = new Scanner (System.in);

System.out.print("Please enter the max number of steps: ");
maxSteps = stdin.nextInt();

System.out.print("\nPlease select search algorithm:\n1. AC2001\n2. AC3\n3. AC3rm\n4. AC3bit+rm\n5. FC\nEnter your
selection: ");
algo = stdin.nextInt();

if (algo == 1)
    algorithm = "AC2001";
else if (algo == 2)
    algorithm = "AC3";
else if (algo == 3)
    algorithm = "AC3rm";
else if (algo == 4)
    algorithm = "AC3bit+rm";
else
    algorithm = "FC";

System.out.print("\nPlease select search strategy:\n1. None\n2. intVarSearch\n3. activityBasedSearch\nEnter your
selection: ");
strategy = stdin.nextInt();

System.out.print("\nPlease select restart strategy:\n1. None\n2. Geometrical Restart\n3. Luby Restart\nEnter your
selection: ");
restartStrategy = stdin.nextInt();

```

```
System.out.print("\nSearching for solution using the " + algorithm + " algorithm\n");
```

```
Variable [] variables = null; //variable's name and domain to be stored here when reading file  
Operator [] operators = null; //operator's name, conditions and effects  
int [] initialState = null; //initial state table;  
int [][] goalState = null; //goal state table
```

```
String fileName = "output.sas"; // The name of the file to open.  
String line = null; // This will reference one line at a time
```

```
try {
```

```
    BufferedReader bufferedReader = new BufferedReader(new FileReader(fileName));
```

```
    //read program parameters
```

```
    while((line = bufferedReader.readLine()) != null) {
```

```
        if (line.equals("begin_variables")) {
```

```
            line = bufferedReader.readLine(); //read next line
```

```
            noOfVars = Integer.parseInt(line); //read number of variables
```

```
            variables = new Variable [noOfVars]; //create variable's table
```

```
            initialState = new int [noOfVars]; //create initial state table
```

```
            guiltyOp = new ArrayList <ArrayList <Integer> >(noOfVars); //create the arraylists of the responsible
```

```
operators
```

```
            for (int i = 0; i < noOfVars; i++) {  
                guiltyOp.add(new ArrayList <Integer>());  
            }
```

```
            //Create Variable objects that will be used with Choco
```

```
            for (int i = 0; i < noOfVars; i++) {  
                line = bufferedReader.readLine(); //read next line  
                String [] parts = line.split(" ");  
                String name = parts[0];
```

```

        int domain = Integer.parseInt(parts[1]) - 1;
        variables[i] = new Variable(name, domain);
    }

}

else if (line.equals("begin_state")) {
    for (int i = 0; i < initialState.length; i++) {
        line = bufferedReader.readLine(); //read next line
        initialState[i] = Integer.parseInt(line);
    }
}

else if (line.equals("begin_goal")) {
    line = bufferedReader.readLine(); //read next line
    int noOfRows = Integer.parseInt(line);
    goalState = new int [noOfRows][2];
    for (int i = 0; i < noOfRows; i++) {
        line = bufferedReader.readLine(); //read next line
        String [] parts = line.split(" ");
        goalState[i][0] = Integer.parseInt(parts[0]);
        goalState[i][1] = Integer.parseInt(parts[1]);
    }

    line = bufferedReader.readLine(); //read "end_goal" line
    noOfOperators = Integer.parseInt(line = bufferedReader.readLine());
    operators = new Operator [noOfOperators];

}

else if (line.equals("begin_operator") && noOfOperators > 0) {
    String name;
    int noOfConditions;
    int noOfEffects;
    int [][] conditions = null;
    int [][] effects;

    name = bufferedReader.readLine(); //read operator's name
    noOfConditions = Integer.parseInt(line=bufferedReader.readLine()); //read number of conditions

```

```

    if (noOfConditions > 0) {
        conditions = new int [noOfConditions][2];

        for (int i = 0; i < noOfConditions; i++) {
            line = bufferedReader.readLine(); //read each condition
            String [] parts = line.split(" ");
            conditions [i][0] = Integer.parseInt(parts[0]);
            conditions [i][1] = Integer.parseInt(parts[1]);
        }
    }

    //conditions read. Time to read the effects
    noOfEffects = Integer.parseInt(line=bufferedReader.readLine()); //read number of effects
    effects = new int [noOfEffects][3];

    for (int i = 0; i < noOfEffects; i++) {
        line = bufferedReader.readLine(); //read each effect
        String [] parts = line.split(" ");
        effects [i][0] = Integer.parseInt(parts[1]); //the variable
        effects [i][1] = Integer.parseInt(parts[2]); //previous value
        effects [i][2] = Integer.parseInt(parts[3]); //next value
        guiltyOp.get(effects[i][0]).add(operators.length - noOfOperators); // this operator is responsible
        for changing the var
    }

    operators[operators.length - noOfOperators] = new Operator (name, conditions, effects);

    noOfOperators--;
}

else
    continue; //skip non important lines!
}

```

```

        // Always close files.
        bufferedReader.close();
    }
    catch(FileNotFoundException ex) {
        System.out.println("Unable to open file '" + fileName + "'");
    }
    catch(IOException ex) {
        System.out.println("Error reading file '" + fileName + "'");
    }
}

//'Output.sas' reading complete. Create choco model

String programStart = java.time.LocalDateTime.now().format(DateTimeFormatter.ofPattern("dd MMM yyyy hh:mm:ss a"));
double startTime = System.currentTimeMillis(); //start timer
double estimatedTime;

//Look for solution step by step
for (int step = 1; step <= maxSteps; step++) {

    Model model = new Model();
    IntVar[][] vars;
    BoolVar[][] ops;

    //initialize vars table
    vars = new IntVar[variables.length][step + 1];
    Variable temp;

    for (int i = 0; i < variables.length; i++) {
        temp = variables[i]; //read next variable

        for (int t = 0; t <= step; t++) {
            vars[i][t] = model.intVar(temp.name+"_t"+ t, 0, temp.domain);
        }
    }
}

```

```

}

//declare initial state
for (int i = 0; i < initialState.length; i++) {
    model.arithm(vars[i][0], "=", initialState[i]).post();
}

//declare goal state
for (int i = 0; i < goalState.length; i++) {
    model.arithm(vars[goalState[i][0]][step], "=", goalState[i][1]).post();
}

//initialize operators table
ops = new BoolVar[operators.length][step];
Operator tempOp;

for (int i = 0; i < operators.length; i++) {
    tempOp = operators[i];

    for (int t = 0; t < step; t++) {
        String name = tempOp.name + "_t" + t;
        ops[i][t] = model.boolVar(name);

        //Constraints must be declared here!!
        if (tempOp.conditions != null) {

            int noOfConds = tempOp.conditions.length; //Number of prevail preconditions

            //for each precondition
            for (int j = 0; j < noOfConds; j++) {
                int [] conds = tempOp.conditions[j]; //read precondition
                int var = conds[0]; //which variable
                int value = conds [1]; //read value
            }
        }
    }
}

```

```

Tuples allowed = new Tuples(); //declare feasible tuples
Tuples allowedPost = new Tuples();

int lower = vars[var][t].getLB(); //read domain
int upper = vars[var][t].getUB(); //

//if precondition is met then action may or may not occur
allowed.add(1, value);
allowed.add(0, value);

//precondition must prevail
allowedPost.add(1, value);

//in case precondition is not met
for (int k = lower; k <= upper; k++) {
    if (k != value) {
        allowed.add(0, k); //action cannot occur

        //since action cannot occur we don't care about post value
        for (int n = lower; n <= upper; n++) {
            allowedPost.add(0, n);
        }
    }
}

model.table(ops[i][t], vars[var][t], allowed, algorithm).post();
model.table(ops[i][t], vars[var][t+1], allowedPost, algorithm).post();
}

//EFFECTS here
int noOfEffects = tempOp.effects.length;

```

```

//for each effect
for (int j = 0; j < noOfEffects; j++) {
    int [] effect = tempOp.effects[j]; //read effect
    int var = effect[0];
    int preValue = effect[1];
    int postValue = effect[2];

    int lower = vars[var][t].getLB(); //read domain
    int upper = vars[var][t].getUB(); //

    //Case of don't care prevalue
    if (preValue == -1) {
        Tuples allowedDontCare = new Tuples();

        //action can occur only if postvalue is satisfied
        allowedDontCare.add(1, postValue);

        //in case the postvalue is not satisfied
        for (int k = lower; k <= upper; k++) {
            allowedDontCare.add(0, k);
        }
        model.table(ops[i][t], vars[var][t+1], allowedDontCare, algorithm).post();
    }

    //Case where prevalue must be satisfied
    else {
        Tuples allowedPreVal = new Tuples();
        Tuples allowedPostVal = new Tuples();

        //if prevalue is satisfied then action may or may not occur
        allowedPreVal.add(1, preValue);

        //if postvalue is satisfied then action may or may not occur
        allowedPostVal.add(1, postValue);
    }
}

```



```

        //if prevalue is not satisfied
        for (int k = lower; k <= upper; k++) {
            allowedPreVal.add(0, k);
            allowedPostVal.add(0, k);
        }
        model.table(ops[i][t], vars[var][t], allowedPreVal, algorithm).post();
        model.table(ops[i][t], vars[var][t+1], allowedPostVal, algorithm).post();
    }
}

//no effect unless an operator occurred
for (int t = 0; t < step; t++) {
    //for each variable
    for (int i = 0; i < noOfVars; i++) {
        BoolVar [] mustBeTrue = new BoolVar [guiltyOp.get(i).size()]; //array to store guilty ops

        for (int k = 0; k < mustBeTrue.length; k++) {
            mustBeTrue[k] = ops[guiltyOp.get(i).get(k)][t];
        }

        //if a var has changed then one guilty op must occurred
        model.ifThen(
            model.arithm(vars[i][t], "!=" , vars[i][t+1]),
            model.sum(mustBeTrue, "=", 1)
        );
    }
}

Solver solver = model.getSolver();

```

```

if (restartStrategy > 1) {
    FailCounter failCounter = new FailCounter(model, 50);

    if (restartStrategy == 2)
        solver.setGeometricalRestart(1, 2, failCounter, 2000);
    else
        solver.setLubyRestart(2, failCounter, 2000);
}

if (strategy == 2)
    solver.setSearch(Search.intVarSearch(model.retrieveIntVars(true)));
else if (strategy == 3)
    solver.setSearch(Search.activityBasedSearch(model.retrieveIntVars(true)));

if (solver.solve()) {
    System.out.println("Solution found in " + step + " steps!");
    System.out.println("Restart " + solver.getRestartCount());
    System.out.println("Fails " + solver.getFailCount());
    for (int i = 0; i < vars[0].length; i++) {
        for (int j = 0; j < vars.length; j++)
            System.out.println(vars[j][i]);
    }
    for (int i = 0; i < ops[0].length; i++) {
        for (int j = 0; j < ops.length; j++)
            System.out.println(ops[j][i]);
    }

    restarts += solver.getRestartCount();
    fails += solver.getFailCount();
    backtracks += solver.getBackTrackCount();

    estimatedTime = (System.currentTimeMillis() - startTime) / 1000;
}

```

```

        System.out.println("Total Restarts = " + restarts + "\nTotal Fails = " + fails + "\nTotal Backtracks = " +
backtracks + "\nTotal time elapsed = " + estimatedTime + " seconds");

        break;
    }

    else if (step == maxSteps) {
        System.out.println("No solution can be found in " + step + " step(s)! \nPlease rerun the program and increase max
steps!");
    }
    else {
        System.out.println("\nNo solution found in " + step + " step(s)! Trying in " + (step + 1) + " steps! \nProgram
started at: " + programStart);
        restarts += solver.getRestartCount();
        fails += solver.getFailCount();
        backtracks += solver.getBackTrackCount();
    }
}

}

}

```

## Παράρτημα Β

Στο Παράρτημα αυτό παρουσιάζεται ο πλήρης κατάλογος των Πειραματικών Αποτελεσμάτων. Όπου υπάρχει το σύμβολο ---, το πρόγραμμα δεν έδωσε λύση στο χρονικό περιθώριο των τεσσάρων ωρών που είχαμε θέσει. Τα προβλήματα Openstacks01, Openstacks02, Openstacks03, Freecell02, Freecell03, Freecell04, Depots03, Depots06, Depots07 και Barman0 δεν έδωσαν λύση για κανένα συνδυασμό αλγορίθμων και στρατηγικών αναζήτησης και επανεκκίνησης μέσα στο χρονικό όριο των τεσσάρων ωρών.

Πρόβλημα Elev1 – Λύση σε 8 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails    | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|----------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 23214      | 11632    | Default             | NULL             | 8,82           |
| AC3       | 0        | 23214      | 11632    | Default             | NULL             | 9,957          |
| AC3rm     | 0        | 23214      | 11632    | Default             | NULL             | 9,805          |
| AC3bit+rm | 0        | 22730      | 11390    | Default             | NULL             | 9,141          |
| FC        | 0        | 33629      | 16844    | Default             | NULL             | 8,730          |
| AC2001    | 0        | 45411      | 22782    | intVarSearch        | NULL             | 16,808         |
| AC3       | 0        | 45411      | 22782    | intVarSearch        | NULL             | 17,907         |
| AC3rm     | 0        | 45411      | 22782    | intVarSearch        | NULL             | 18,053         |
| AC3bit+rm | 0        | 29628      | 14834    | intVarSearch        | NULL             | 11,780         |
| FC        | 0        | 52170      | 26162    | intVarSearch        | NULL             | 15,370         |
| AC2001    | 56666    | 31663776   | 15888628 | activityBasedSearch | NULL             | 6519,735       |
| AC3       | 56666    | 31663776   | 15888628 | activityBasedSearch | NULL             | 7214,479       |
| AC3rm     | 56666    | 31663776   | 15888628 | activityBasedSearch | NULL             | 7523,422       |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | 56814    | 114086     | 113897   | activityBasedSearch | NULL             | 109,600        |
| AC2001    | 45       | 10564      | 5571     | Default             | Geometrical      | 4,788          |
| AC3       | 45       | 10564      | 5571     | Default             | Geometrical      | 5,071          |
| AC3rm     | 45       | 10564      | 5571     | Default             | Geometrical      | 4,929          |
| AC3bit+rm | 45       | 10564      | 5571     | Default             | Geometrical      | 4,882          |
| FC        | 42       | 7487       | 4100     | Default             | Geometrical      | 3,419          |
| AC2001    | 46       | 30585      | 15708    | intVarSearch        | Geometrical      | 12,978         |
| AC3       | 46       | 30585      | 15708    | intVarSearch        | Geometrical      | 14,042         |
| AC3rm     | 46       | 30585      | 15708    | intVarSearch        | Geometrical      | 13,614         |
| AC3bit+rm | 46       | 26561      | 13690    | intVarSearch        | Geometrical      | 11,420         |
| FC        | 43       | 28476      | 14602    | intVarSearch        | Geometrical      | 8,843          |
| AC2001    | 56747    | 447977     | 281164   | activityBasedSearch | Geometrical      | 189,124        |
| AC3       | 56747    | 447977     | 281164   | activityBasedSearch | Geometrical      | 210,978        |
| AC3rm     | 56747    | 447977     | 281164   | activityBasedSearch | Geometrical      | 216,233        |
| AC3bit+rm | 56766    | 123334     | 118500   | activityBasedSearch | Geometrical      | 132,292        |
| FC        | 56891    | 212175     | 163140   | activityBasedSearch | Geometrical      | 127,713        |

|           |       |         |         |                     |      |         |
|-----------|-------|---------|---------|---------------------|------|---------|
| AC2001    | 5103  | 78615   | 52292   | Default             | Luby | 59,840  |
| AC3       | 5103  | 78615   | 52292   | Default             | Luby | 63,578  |
| AC3rm     | 5103  | 78615   | 52292   | Default             | Luby | 63,075  |
| AC3bit+rm | 5103  | 73833   | 49818   | Default             | Luby | 53,964  |
| FC        | 1829  | 20586   | 15032   | Default             | Luby | 14,987  |
| AC2001    | 1850  | 22271   | 15963   | intVarSearch        | Luby | 20,776  |
| AC3       | 1850  | 22271   | 15963   | intVarSearch        | Luby | 22,239  |
| AC3rm     | 1850  | 22271   | 15963   | intVarSearch        | Luby | 22,050  |
| AC3bit+rm | 2829  | 51734   | 33387   | intVarSearch        | Luby | 41,476  |
| FC        | 3289  | 45914   | 31501   | intVarSearch        | Luby | 34,474  |
| AC2001    | 64497 | 735955  | 428476  | activityBasedSearch | Luby | 231,129 |
| AC3       | 64497 | 735955  | 428476  | activityBasedSearch | Luby | 254,263 |
| AC3rm     | 64497 | 735955  | 428476  | activityBasedSearch | Luby | 257,549 |
| AC3bit+rm | 64527 | 188066  | 155197  | activityBasedSearch | Luby | 153,276 |
| FC        | 63935 | 2051423 | 1084682 | activityBasedSearch | Luby | 457,837 |

Πρόβλημα Elev2 – Λύση σε 11 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails   | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|---------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 2688459    | 1344275 | Default             | NULL             | 1952,552       |
| AC3       | 0        | 2688459    | 1344275 | Default             | NULL             | 2082,872       |
| AC3rm     | 0        | 2688459    | 1344275 | Default             | NULL             | 2129,244       |
| AC3bit+rm | 0        | 3365205    | 1682656 | Default             | NULL             | 2805,718       |
| FC        | 0        | 17283457   | 8641859 | Default             | NULL             | 11741,801      |
| AC2001    | 0        | 5829044    | 2914574 | intVarSearch        | NULL             | 3767,760       |
| AC3       | 0        | 5829044    | 2914574 | intVarSearch        | NULL             | 4270,352       |
| AC3rm     | 0        | 5829044    | 2914574 | intVarSearch        | NULL             | 4673,534       |
| AC3bit+rm | 0        | 4511488    | 2255829 | intVarSearch        | NULL             | 4078,521       |
| FC        | 0        | 3713495    | 1856782 | intVarSearch        | NULL             | 2903,376       |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC2001    | 103      | 5028561    | 2516144 | Default             | Geometrical      | 4634,461       |
| AC3       | 103      | 5028561    | 2516144 | Default             | Geometrical      | 4893,089       |
| AC3rm     | 103      | 5028561    | 2516144 | Default             | Geometrical      | 4538,099       |
| AC3bit+rm | 101      | 3831308    | 1917489 | Default             | Geometrical      | 3556,878       |
| FC        | 101      | 5357501    | 2680422 | Default             | Geometrical      | 4369,486       |
| AC2001    | 99       | 3144984    | 1574493 | intVarSearch        | Geometrical      | 2909,895       |
| AC3       | 99       | 3144984    | 1574493 | intVarSearch        | Geometrical      | 3115,035       |
| AC3rm     | 99       | 3144984    | 1574493 | intVarSearch        | Geometrical      | 3053,838       |
| AC3bit+rm | 96       | 3433832    | 1718822 | intVarSearch        | Geometrical      | 3225,701       |
| FC        | 101      | 3832202    | 1918007 | intVarSearch        | Geometrical      | 3248,979       |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | 10678    | 2676604    | 1367404 | Default             | Luby             | 2534,165       |
| AC3       | 10678    | 2676604    | 1367404 | Default             | Luby             | 2691,373       |
| AC3rm     | 10678    | 2676604    | 1367404 | Default             | Luby             | 2824,960       |
| AC3bit+rm | 11126    | 3091415    | 1576459 | Default             | Luby             | 3061,560       |
| FC        | 12160    | 3606428    | 1835168 | Default             | Luby             | 2800,404       |
| AC2001    | 11191    | 3113119    | 1587736 | intVarSearch        | Luby             | 2933,434       |
| AC3       | 11191    | 3113119    | 1587736 | intVarSearch        | Luby             | 2972,180       |
| AC3rm     | 11191    | 3113119    | 1587736 | intVarSearch        | Luby             | 3235,098       |
| AC3bit+rm | 10725    | 2043196    | 1051454 | intVarSearch        | Luby             | 1863,849       |
| FC        | 10607    | 1952963    | 1004766 | intVarSearch        | Luby             | 1774,630       |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |

Πρόβλημα Elev3 – Λύση σε 7 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails    | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|----------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 3720960    | 1860510  | Default             | NULL             | 2072,090       |
| AC3       | 0        | 3720960    | 1860510  | Default             | NULL             | 2324,474       |
| AC3rm     | 0        | 3720960    | 1860510  | Default             | NULL             | 2405,282       |
| AC3bit+rm | 0        | 2585984    | 1293014  | Default             | NULL             | 1555,843       |
| FC        | 0        | 3233097    | 1616608  | Default             | NULL             | 1414,100       |
| AC2001    | 0        | 3000972    | 1500557  | intVarSearch        | NULL             | 1538,062       |
| AC3       | 0        | 3000972    | 1500557  | intVarSearch        | NULL             | 1627,717       |
| AC3rm     | 0        | 3000972    | 1500557  | intVarSearch        | NULL             | 1682,278       |
| AC3bit+rm | 0        | 2065607    | 1032871  | intVarSearch        | NULL             | 1153,723       |
| FC        | 0        | 5307546    | 2653808  | intVarSearch        | NULL             | 2513,061       |
| AC2001    | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC2001    | 65       | 3215475    | 1609090  | Default             | Geometrical      | 1709,616       |
| AC3       | 65       | 3215475    | 1609090  | Default             | Geometrical      | 1733,773       |
| AC3rm     | 65       | 3215475    | 1609090  | Default             | Geometrical      | 2049,225       |
| AC3bit+rm | 62       | 2334298    | 1168231  | Default             | Geometrical      | 1424,463       |
| FC        | 63       | 1836401    | 919015   | Default             | Geometrical      | 844,405        |
| AC2001    | 67       | 7374342    | 3688585  | intVarSearch        | Geometrical      | 3163,806       |
| AC3       | 67       | 7374342    | 3688585  | intVarSearch        | Geometrical      | 3812,186       |
| AC3rm     | 67       | 7374342    | 3688585  | intVarSearch        | Geometrical      | 3922,551       |
| AC3bit+rm | 63       | 1488731    | 745608   | intVarSearch        | Geometrical      | 837,165        |
| FC        | 61       | 1027098    | 514463   | intVarSearch        | Geometrical      | 437,560        |
| AC2001    | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | 6522     | 1751535    | 893573   | Default             | Luby             | 996,405        |
| AC3       | 6522     | 1751535    | 893573   | Default             | Luby             | 989,892        |
| AC3rm     | 6522     | 1751535    | 893573   | Default             | Luby             | 1162,727       |
| AC3bit+rm | 6522     | 2123004    | 1079311  | Default             | Luby             | 1327,107       |
| FC        | 7051     | 31546250   | 15792018 | Default             | Luby             | 15674,946      |
| AC2001    | 6537     | 22121360   | 11078883 | intVarSearch        | Luby             | 10374,220      |
| AC3       | 6537     | 22121360   | 11078883 | intVarSearch        | Luby             | 10847,898      |
| AC3rm     | 6537     | 22121360   | 11078883 | intVarSearch        | Luby             | 11941,038      |
| AC3bit+rm | 6537     | 922527     | 479158   | intVarSearch        | Luby             | 573,238        |
| FC        | 6540     | 4608203    | 2321327  | intVarSearch        | Luby             | 1995,211       |
| AC2001    | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Luby             | ---            |

Πρόβλημα Elev4 – Λύση σε 11 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails   | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|---------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 1618745    | 809434  | Default             | NULL             | 2444,999       |
| AC3       | 0        | 1618745    | 809434  | Default             | NULL             | 2833,415       |
| AC3rm     | 0        | 1618745    | 809434  | Default             | NULL             | 2491,522       |
| AC3bit+rm | 0        | 6743655    | 3371886 | Default             | NULL             | 10645,576      |
| FC        | 0        | 4303542    | 2151820 | Default             | NULL             | 6594,306       |
| AC2001    | 0        | 1750715    | 875506  | intVarSearch        | NULL             | 3058,311       |
| AC3       | 0        | 1750715    | 875506  | intVarSearch        | NULL             | 3158,425       |
| AC3rm     | 0        | 1750715    | 875506  | intVarSearch        | NULL             | 2995,317       |
| AC3bit+rm | 0        | 10995129   | 5497726 | intVarSearch        | NULL             | 18024,373      |
| FC        | 0        | 10390762   | 5195469 | intVarSearch        | NULL             | 12660,279      |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC2001    | 100      | 4665196    | 2334267 | Default             | Geometrical      | 8598,953       |
| AC3       | 100      | 4665196    | 2334267 | Default             | Geometrical      | 8793,951       |
| AC3rm     | 100      | 4665196    | 2334267 | Default             | Geometrical      | 8919,354       |
| AC3bit+rm | 102      | 4659318    | 2331554 | Default             | Geometrical      | 8972,523       |
| FC        | ---      | ---        | ---     | Default             | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | intVarSearch        | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | intVarSearch        | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | intVarSearch        | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | intVarSearch        | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | intVarSearch        | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | Default             | Luby             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | Default             | Luby             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | Default             | Luby             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | Default             | Luby             | ---            |
| FC        | 11214    | 4560823    | 2309503 | Default             | Luby             | 5150,456       |
| AC2001    | 9374     | 4674457    | 2362992 | intVarSearch        | Luby             | 9485,952       |
| AC3       | 9374     | 4674457    | 2362992 | intVarSearch        | Luby             | 9585,886       |
| AC3rm     | 9374     | 4674457    | 2362992 | intVarSearch        | Luby             | 9560,721       |
| AC3bit+rm | 10287    | 1663078    | 860222  | intVarSearch        | Luby             | 3601,01        |
| FC        | 10131    | 8002866    | 4028213 | intVarSearch        | Luby             | 12576,306      |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |



Πρόβλημα Storage01 – Λύση σε 3 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | Default             | NULL             | 0,132          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | Default             | NULL             | 0,102          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | Default             | NULL             | 0,107          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | Default             | NULL             | 0,108          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | Default             | NULL             | 0,107          |
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | NULL             | 0,101          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | NULL             | 0,110          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | NULL             | 0,104          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | NULL             | 0,112          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | NULL             | 0,108          |
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | NULL             | 0,106          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | NULL             | 0,110          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | NULL             | 0,107          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | NULL             | 0,100          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | NULL             | 0,107          |
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | Default             | Geometrical      | 0,099          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | Default             | Geometrical      | 0,105          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | Default             | Geometrical      | 0,108          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | Default             | Geometrical      | 0,099          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | Default             | Geometrical      | 0,106          |
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,107          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,106          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,111          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,114          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,099          |
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,110          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,103          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,115          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,106          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,101          |
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | Default             | Luby             | 0,105          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | Default             | Luby             | 0,103          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | Default             | Luby             | 0,109          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | Default             | Luby             | 0,103          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | Default             | Luby             | 0,114          |
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Luby             | 0,103          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Luby             | 0,101          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Luby             | 0,108          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Luby             | 0,108          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | intVarSearch        | Luby             | 0,100          |
| AC2001    | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Luby             | 0,101          |
| AC3       | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Luby             | 0,111          |
| AC3rm     | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Luby             | 0,109          |
| AC3bit+rm | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Luby             | 0,105          |
| FC        | 0        | 0          | 2     | activityBasedSearch | Luby             | 0,100          |

Πρόβλημα Storage02 – Λύση σε 3 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 34         | 21    | Default             | NULL             | 0,128          |
| AC3       | 0        | 34         | 21    | Default             | NULL             | 0,122          |
| AC3rm     | 0        | 34         | 21    | Default             | NULL             | 0,136          |
| AC3bit+rm | 0        | 34         | 21    | Default             | NULL             | 0,131          |
| FC        | 0        | 34         | 21    | Default             | NULL             | 0,123          |
| AC2001    | 0        | 31         | 19    | intVarSearch        | NULL             | 0,129          |
| AC3       | 0        | 31         | 19    | intVarSearch        | NULL             | 0,132          |
| AC3rm     | 0        | 31         | 19    | intVarSearch        | NULL             | 0,134          |
| AC3bit+rm | 0        | 31         | 19    | intVarSearch        | NULL             | 0,129          |
| FC        | 0        | 31         | 19    | intVarSearch        | NULL             | 0,128          |
| AC2001    | 5        | 0          | 7     | activityBasedSearch | NULL             | 0,123          |
| AC3       | 5        | 0          | 7     | activityBasedSearch | NULL             | 0,127          |
| AC3rm     | 5        | 0          | 7     | activityBasedSearch | NULL             | 0,128          |
| AC3bit+rm | 5        | 0          | 7     | activityBasedSearch | NULL             | 0,123          |
| FC        | 5        | 0          | 7     | activityBasedSearch | NULL             | 0,125          |
| AC2001    | 1        | 0          | 3     | Default             | Geometrical      | 0,120          |
| AC3       | 1        | 0          | 3     | Default             | Geometrical      | 0,125          |
| AC3rm     | 1        | 0          | 3     | Default             | Geometrical      | 0,131          |
| AC3bit+rm | 1        | 0          | 3     | Default             | Geometrical      | 0,115          |
| FC        | 1        | 0          | 3     | Default             | Geometrical      | 0,113          |
| AC2001    | 1        | 0          | 3     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,123          |
| AC3       | 1        | 0          | 3     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,127          |
| AC3rm     | 1        | 0          | 3     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,119          |
| AC3bit+rm | 1        | 0          | 3     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,117          |
| FC        | 1        | 0          | 3     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,116          |
| AC2001    | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,124          |
| AC3       | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,131          |
| AC3rm     | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,135          |
| AC3bit+rm | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,128          |
| FC        | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,125          |
| AC2001    | 1        | 1          | 4     | Default             | Luby             | 0,128          |
| AC3       | 1        | 1          | 4     | Default             | Luby             | 0,125          |
| AC3rm     | 1        | 1          | 4     | Default             | Luby             | 0,137          |
| AC3bit+rm | 1        | 1          | 4     | Default             | Luby             | 0,123          |
| FC        | 1        | 1          | 4     | Default             | Luby             | 0,123          |
| AC2001    | 2        | 4          | 8     | intVarSearch        | Luby             | 0,120          |
| AC3       | 2        | 4          | 8     | intVarSearch        | Luby             | 0,130          |
| AC3rm     | 2        | 4          | 8     | intVarSearch        | Luby             | 0,128          |
| AC3bit+rm | 2        | 4          | 8     | intVarSearch        | Luby             | 0,124          |
| FC        | 2        | 4          | 8     | intVarSearch        | Luby             | 0,122          |
| AC2001    | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Luby             | 0,126          |
| AC3       | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Luby             | 0,120          |
| AC3rm     | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Luby             | 0,135          |
| AC3bit+rm | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Luby             | 0,139          |
| FC        | 7        | 0          | 7     | activityBasedSearch | Luby             | 0,123          |

Πρόβλημα Storage03 – Λύση σε 3 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 4          | 6     | Default             | NULL             | 0,140          |
| AC3       | 0        | 4          | 6     | Default             | NULL             | 0,143          |
| AC3rm     | 0        | 4          | 6     | Default             | NULL             | 0,150          |
| AC3bit+rm | 0        | 4          | 6     | Default             | NULL             | 0,139          |
| FC        | 0        | 5          | 7     | Default             | NULL             | 0,128          |
| AC2001    | 0        | 4          | 6     | intVarSearch        | NULL             | 0,143          |
| AC3       | 0        | 4          | 6     | intVarSearch        | NULL             | 0,140          |
| AC3rm     | 0        | 4          | 6     | intVarSearch        | NULL             | 0,152          |
| AC3bit+rm | 0        | 4          | 6     | intVarSearch        | NULL             | 0,137          |
| FC        | 0        | 5          | 7     | intVarSearch        | NULL             | 0,131          |
| AC2001    | 12       | 0          | 14    | activityBasedSearch | NULL             | 0,150          |
| AC3       | 12       | 0          | 14    | activityBasedSearch | NULL             | 0,156          |
| AC3rm     | 12       | 0          | 14    | activityBasedSearch | NULL             | 0,152          |
| AC3bit+rm | 12       | 0          | 14    | activityBasedSearch | NULL             | 0,169          |
| FC        | 12       | 0          | 14    | activityBasedSearch | NULL             | 0,156          |
| AC2001    | 2        | 2          | 6     | Default             | Geometrical      | 0,141          |
| AC3       | 2        | 2          | 6     | Default             | Geometrical      | 0,167          |
| AC3rm     | 2        | 2          | 6     | Default             | Geometrical      | 0,142          |
| AC3bit+rm | 2        | 2          | 6     | Default             | Geometrical      | 0,146          |
| FC        | 2        | 2          | 6     | Default             | Geometrical      | 0,135          |
| AC2001    | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,138          |
| AC3       | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,141          |
| AC3rm     | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,136          |
| AC3bit+rm | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,141          |
| FC        | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,145          |
| AC2001    | 15       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,144          |
| AC3       | 15       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,145          |
| AC3rm     | 15       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,148          |
| AC3bit+rm | 15       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,157          |
| FC        | 15       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Geometrical      | 0,154          |
| AC2001    | 2        | 2          | 6     | Default             | Luby             | 0,144          |
| AC3       | 2        | 2          | 6     | Default             | Luby             | 0,144          |
| AC3rm     | 2        | 2          | 6     | Default             | Luby             | 0,142          |
| AC3bit+rm | 2        | 2          | 6     | Default             | Luby             | 0,142          |
| FC        | 2        | 2          | 6     | Default             | Luby             | 0,134          |
| AC2001    | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Luby             | 0,139          |
| AC3       | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Luby             | 0,146          |
| AC3rm     | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Luby             | 0,155          |
| AC3bit+rm | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Luby             | 0,136          |
| FC        | 2        | 2          | 6     | intVarSearch        | Luby             | 0,135          |
| AC2001    | 17       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Luby             | 0,151          |
| AC3       | 17       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Luby             | 0,163          |
| AC3rm     | 17       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Luby             | 0,152          |
| AC3bit+rm | 17       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Luby             | 0,161          |
| FC        | 17       | 0          | 14    | activityBasedSearch | Luby             | 0,147          |

Πρόβλημα Storage04 – Λύση σε 8 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 10998      | 5541  | Default             | NULL             | 1,261          |
| AC3       | 0        | 10998      | 5541  | Default             | NULL             | 1,324          |
| AC3rm     | 0        | 10998      | 5541  | Default             | NULL             | 1,312          |
| AC3bit+rm | 0        | 8273       | 4166  | Default             | NULL             | 1,006          |
| FC        | 0        | 5767       | 2904  | Default             | NULL             | 0,737          |
| AC2001    | 0        | 6738       | 3404  | intVarSearch        | NULL             | 0,863          |
| AC3       | 0        | 6738       | 3404  | intVarSearch        | NULL             | 0,842          |
| AC3rm     | 0        | 6738       | 3404  | intVarSearch        | NULL             | 0,836          |
| AC3bit+rm | 0        | 6463       | 3266  | intVarSearch        | NULL             | 0,794          |
| FC        | 0        | 12605      | 6340  | intVarSearch        | NULL             | 1,111          |
| AC2001    | 8883     | 19643      | 18732 | activityBasedSearch | NULL             | 4,896          |
| AC3       | 8883     | 19643      | 18732 | activityBasedSearch | NULL             | 5,134          |
| AC3rm     | 8883     | 19643      | 18732 | activityBasedSearch | NULL             | 4,968          |
| AC3bit+rm | 8883     | 18419      | 18123 | activityBasedSearch | NULL             | 4,734          |
| FC        | 9040     | 7403       | 12757 | activityBasedSearch | NULL             | 4,013          |
| AC2001    | 41       | 8878       | 4629  | Default             | Geometrical      | 1,059          |
| AC3       | 41       | 8878       | 4629  | Default             | Geometrical      | 1,147          |
| AC3rm     | 41       | 8878       | 4629  | Default             | Geometrical      | 1,097          |
| AC3bit+rm | 40       | 7158       | 3755  | Default             | Geometrical      | 0,934          |
| FC        | 44       | 11076      | 5766  | Default             | Geometrical      | 1,145          |
| AC2001    | 37       | 4511       | 2417  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,761          |
| AC3       | 37       | 4511       | 2417  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,818          |
| AC3rm     | 37       | 4511       | 2417  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,776          |
| AC3bit+rm | 37       | 3581       | 1958  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,607          |
| FC        | 45       | 9701       | 5106  | intVarSearch        | Geometrical      | 1,078          |
| AC2001    | 8948     | 25175      | 21571 | activityBasedSearch | Geometrical      | 5,159          |
| AC3       | 8948     | 25175      | 21571 | activityBasedSearch | Geometrical      | 5,501          |
| AC3rm     | 8948     | 25175      | 21571 | activityBasedSearch | Geometrical      | 5,348          |
| AC3bit+rm | 8948     | 27169      | 22611 | activityBasedSearch | Geometrical      | 5,573          |
| FC        | 9105     | 23006      | 20655 | activityBasedSearch | Geometrical      | 4,920          |
| AC2001    | 2457     | 33311      | 22458 | Default             | Luby             | 4,651          |
| AC3       | 2457     | 33311      | 22458 | Default             | Luby             | 4,944          |
| AC3rm     | 2457     | 33311      | 22458 | Default             | Luby             | 4,613          |
| AC3bit+rm | 2385     | 36465      | 23715 | Default             | Luby             | 4,856          |
| FC        | 3576     | 51072      | 34082 | Default             | Luby             | 6,364          |
| AC2001    | 2790     | 38912      | 26306 | intVarSearch        | Luby             | 5,381          |
| AC3       | 2790     | 38912      | 26306 | intVarSearch        | Luby             | 5,753          |
| AC3rm     | 2790     | 38912      | 26306 | intVarSearch        | Luby             | 5,633          |
| AC3bit+rm | 3194     | 46816      | 31024 | intVarSearch        | Luby             | 6,222          |
| FC        | 3302     | 50226      | 33343 | intVarSearch        | Luby             | 5,693          |
| AC2001    | 12974    | 51355      | 41547 | activityBasedSearch | Luby             | 9,554          |
| AC3       | 12974    | 51355      | 41547 | activityBasedSearch | Luby             | 10,432         |
| AC3rm     | 12974    | 51355      | 41547 | activityBasedSearch | Luby             | 9,784          |
| AC3bit+rm | 12909    | 85786      | 59040 | activityBasedSearch | Luby             | 11,502         |
| FC        | 13180    | 38810      | 35201 | activityBasedSearch | Luby             | 8,048          |

Πρόβλημα Storage05 – Λύση σε 6 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 2093       | 1056  | Default             | NULL             | 0,500          |
| AC3       | 0        | 2093       | 1056  | Default             | NULL             | 0,549          |
| AC3rm     | 0        | 2093       | 1056  | Default             | NULL             | 0,548          |
| AC3bit+rm | 0        | 2093       | 1056  | Default             | NULL             | 0,472          |
| FC        | 0        | 1793       | 908   | Default             | NULL             | 0,428          |
| AC2001    | 0        | 2433       | 1228  | intVarSearch        | NULL             | 0,519          |
| AC3       | 0        | 2433       | 1228  | intVarSearch        | NULL             | 0,525          |
| AC3rm     | 0        | 2433       | 1228  | intVarSearch        | NULL             | 0,618          |
| AC3bit+rm | 0        | 2433       | 1228  | intVarSearch        | NULL             | 0,505          |
| FC        | 0        | 1945       | 981   | intVarSearch        | NULL             | 0,448          |
| AC2001    | 6027     | 4665       | 8375  | activityBasedSearch | NULL             | 3,643          |
| AC3       | 6027     | 4665       | 8375  | activityBasedSearch | NULL             | 3,833          |
| AC3rm     | 6027     | 4665       | 8375  | activityBasedSearch | NULL             | 3,698          |
| AC3bit+rm | 6027     | 1515       | 6806  | activityBasedSearch | NULL             | 3,380          |
| FC        | 6005     | 8691       | 10378 | activityBasedSearch | NULL             | 3,726          |
| AC2001    | 23       | 1802       | 1000  | Default             | Geometrical      | 0,527          |
| AC3       | 23       | 1802       | 1000  | Default             | Geometrical      | 0,538          |
| AC3rm     | 23       | 1802       | 1000  | Default             | Geometrical      | 0,595          |
| AC3bit+rm | 23       | 1802       | 1000  | Default             | Geometrical      | 0,544          |
| FC        | 25       | 2224       | 1209  | Default             | Geometrical      | 0,563          |
| AC2001    | 30       | 9631       | 5020  | intVarSearch        | Geometrical      | 1,137          |
| AC3       | 30       | 9631       | 5020  | intVarSearch        | Geometrical      | 1,203          |
| AC3rm     | 30       | 9631       | 5020  | intVarSearch        | Geometrical      | 1,227          |
| AC3bit+rm | 28       | 5286       | 2783  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,817          |
| FC        | 27       | 3815       | 2022  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,677          |
| AC2001    | 6070     | 10461      | 11331 | activityBasedSearch | Geometrical      | 3,965          |
| AC3       | 6070     | 10461      | 11331 | activityBasedSearch | Geometrical      | 4,220          |
| AC3rm     | 6070     | 10461      | 11331 | activityBasedSearch | Geometrical      | 4,068          |
| AC3bit+rm | 6073     | 62302      | 37288 | activityBasedSearch | Geometrical      | 7,898          |
| FC        | 6052     | 45273      | 28788 | activityBasedSearch | Geometrical      | 6,312          |
| AC2001    | 598      | 7014       | 4864  | Default             | Luby             | 1,480          |
| AC3       | 598      | 7014       | 4864  | Default             | Luby             | 1,510          |
| AC3rm     | 598      | 7014       | 4864  | Default             | Luby             | 1,571          |
| AC3bit+rm | 598      | 7117       | 4966  | Default             | Luby             | 1,547          |
| FC        | 1213     | 16217      | 10851 | Default             | Luby             | 2,473          |
| AC2001    | 1342     | 17124      | 11867 | intVarSearch        | Luby             | 3,027          |
| AC3       | 1342     | 17124      | 11867 | intVarSearch        | Luby             | 3,227          |
| AC3rm     | 1342     | 17124      | 11867 | intVarSearch        | Luby             | 3,195          |
| AC3bit+rm | 1214     | 14765      | 10335 | intVarSearch        | Luby             | 2,932          |
| FC        | 1179     | 16417      | 11024 | intVarSearch        | Luby             | 2,447          |
| AC2001    | 8775     | 28331      | 24930 | activityBasedSearch | Luby             | 7,207          |
| AC3       | 8775     | 28331      | 24930 | activityBasedSearch | Luby             | 7,750          |
| AC3rm     | 8775     | 28331      | 24930 | activityBasedSearch | Luby             | 7,507          |
| AC3bit+rm | 8417     | 21390      | 20728 | activityBasedSearch | Luby             | 6,349          |
| FC        | 7593     | 8253       | 11810 | activityBasedSearch | Luby             | 4,096          |

Πρόβλημα Storage06 – Λύση σε 6 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 2103       | 1063  | Default             | NULL             | 0,628          |
| AC3       | 0        | 2103       | 1063  | Default             | NULL             | 0,637          |
| AC3rm     | 0        | 2103       | 1063  | Default             | NULL             | 0,657          |
| AC3bit+rm | 0        | 2103       | 1063  | Default             | NULL             | 0,616          |
| FC        | 0        | 2483       | 1250  | Default             | NULL             | 0,596          |
| AC2001    | 0        | 4633       | 2342  | intVarSearch        | NULL             | 0,862          |
| AC3       | 0        | 4633       | 2342  | intVarSearch        | NULL             | 0,881          |
| AC3rm     | 0        | 4633       | 2342  | intVarSearch        | NULL             | 0,909          |
| AC3bit+rm | 0        | 4633       | 2342  | intVarSearch        | NULL             | 0,866          |
| FC        | 0        | 6341       | 3201  | intVarSearch        | NULL             | 0,917          |
| AC2001    | 7076     | 36974      | 25583 | activityBasedSearch | NULL             | 7,618          |
| AC3       | 7076     | 36974      | 25583 | activityBasedSearch | NULL             | 8,398          |
| AC3rm     | 7076     | 36974      | 25583 | activityBasedSearch | NULL             | 8,180          |
| AC3bit+rm | 7076     | 26811      | 20505 | activityBasedSearch | NULL             | 7,022          |
| FC        | 7054     | 22085      | 18130 | activityBasedSearch | NULL             | 6,344          |
| AC2001    | 26       | 3511       | 1872  | Default             | Geometrical      | 0,827          |
| AC3       | 26       | 3511       | 1872  | Default             | Geometrical      | 0,865          |
| AC3rm     | 26       | 3511       | 1872  | Default             | Geometrical      | 0,864          |
| AC3bit+rm | 26       | 3511       | 1872  | Default             | Geometrical      | 0,859          |
| FC        | 28       | 3729       | 1990  | Default             | Geometrical      | 0,819          |
| AC2001    | 27       | 3944       | 2116  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,924          |
| AC3       | 27       | 3944       | 2116  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,893          |
| AC3rm     | 27       | 3944       | 2116  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,928          |
| AC3bit+rm | 27       | 3944       | 2116  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,865          |
| FC        | 27       | 3842       | 2064  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,804          |
| AC2001    | 7122     | 24436      | 19422 | activityBasedSearch | Geometrical      | 6,717          |
| AC3       | 7122     | 24436      | 19422 | activityBasedSearch | Geometrical      | 7,107          |
| AC3rm     | 7122     | 24436      | 19422 | activityBasedSearch | Geometrical      | 7,238          |
| AC3bit+rm | 7126     | 107700     | 61159 | activityBasedSearch | Geometrical      | 14,650         |
| FC        | 7098     | 21312      | 17766 | activityBasedSearch | Geometrical      | 6,121          |
| AC2001    | 622      | 7240       | 5105  | Default             | Luby             | 2,016          |
| AC3       | 622      | 7240       | 5105  | Default             | Luby             | 2,088          |
| AC3rm     | 622      | 7240       | 5105  | Default             | Luby             | 2,004          |
| AC3bit+rm | 622      | 7240       | 5105  | Default             | Luby             | 1,912          |
| FC        | 1103     | 14876      | 10146 | Default             | Luby             | 3,014          |
| AC2001    | 574      | 6600       | 4718  | intVarSearch        | Luby             | 1,886          |
| AC3       | 574      | 6600       | 4718  | intVarSearch        | Luby             | 1,896          |
| AC3rm     | 574      | 6600       | 4718  | intVarSearch        | Luby             | 1,957          |
| AC3bit+rm | 574      | 6600       | 4718  | intVarSearch        | Luby             | 1,811          |
| FC        | 1119     | 14970      | 10195 | intVarSearch        | Luby             | 2,949          |
| AC2001    | 11258    | 46921      | 39095 | activityBasedSearch | Luby             | 12,152         |
| AC3       | 11258    | 46921      | 39095 | activityBasedSearch | Luby             | 13,337         |
| AC3rm     | 11258    | 46921      | 39095 | activityBasedSearch | Luby             | 12,914         |
| AC3bit+rm | 10106    | 30208      | 27315 | activityBasedSearch | Luby             | 9,729          |
| FC        | 10260    | 33073      | 29888 | activityBasedSearch | Luby             | 9,936          |

Πρόβλημα Satellite01 – Λύση σε 8 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 378        | 195   | Default             | NULL             | 0,256          |
| AC3       | 0        | 378        | 195   | Default             | NULL             | 0,257          |
| AC3rm     | 0        | 378        | 195   | Default             | NULL             | 0,286          |
| AC3bit+rm | 0        | 378        | 195   | Default             | NULL             | 0,232          |
| FC        | 0        | 378        | 195   | Default             | NULL             | 0,236          |
| AC2001    | 0        | 555        | 285   | intVarSearch        | NULL             | 0,280          |
| AC3       | 0        | 555        | 285   | intVarSearch        | NULL             | 0,301          |
| AC3rm     | 0        | 555        | 285   | intVarSearch        | NULL             | 0,290          |
| AC3bit+rm | 0        | 555        | 285   | intVarSearch        | NULL             | 0,288          |
| FC        | 0        | 555        | 285   | intVarSearch        | NULL             | 0,250          |
| AC2001    | 7458     | 1075       | 8000  | activityBasedSearch | NULL             | 1,556          |
| AC3       | 7458     | 1075       | 8000  | activityBasedSearch | NULL             | 1,641          |
| AC3rm     | 7458     | 1075       | 8000  | activityBasedSearch | NULL             | 1,621          |
| AC3bit+rm | 7458     | 967        | 7946  | activityBasedSearch | NULL             | 1,661          |
| FC        | 7424     | 1047       | 7952  | activityBasedSearch | NULL             | 1,544          |
| AC2001    | 20       | 284        | 180   | Default             | Geometrical      | 0,279          |
| AC3       | 20       | 284        | 180   | Default             | Geometrical      | 0,268          |
| AC3rm     | 20       | 284        | 180   | Default             | Geometrical      | 0,264          |
| AC3bit+rm | 20       | 284        | 180   | Default             | Geometrical      | 0,242          |
| FC        | 20       | 284        | 180   | Default             | Geometrical      | 0,232          |
| AC2001    | 19       | 321        | 197   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,265          |
| AC3       | 19       | 321        | 197   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,270          |
| AC3rm     | 19       | 321        | 197   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,271          |
| AC3bit+rm | 19       | 321        | 197   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,249          |
| FC        | 19       | 321        | 197   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,251          |
| AC2001    | 7525     | 907        | 7929  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,581          |
| AC3       | 7525     | 907        | 7929  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,634          |
| AC3rm     | 7525     | 907        | 7929  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,628          |
| AC3bit+rm | 7525     | 887        | 7919  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,629          |
| FC        | 7478     | 833        | 7845  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,515          |
| AC2001    | 114      | 787        | 603   | Default             | Luby             | 0,338          |
| AC3       | 114      | 787        | 603   | Default             | Luby             | 0,358          |
| AC3rm     | 114      | 787        | 603   | Default             | Luby             | 0,355          |
| AC3bit+rm | 114      | 787        | 603   | Default             | Luby             | 0,330          |
| FC        | 114      | 787        | 603   | Default             | Luby             | 0,310          |
| AC2001    | 178      | 1319       | 994   | intVarSearch        | Luby             | 0,393          |
| AC3       | 178      | 1319       | 994   | intVarSearch        | Luby             | 0,435          |
| AC3rm     | 178      | 1319       | 994   | intVarSearch        | Luby             | 0,434          |
| AC3bit+rm | 178      | 1319       | 994   | intVarSearch        | Luby             | 0,409          |
| FC        | 178      | 1319       | 994   | intVarSearch        | Luby             | 0,434          |
| AC2001    | 8723     | 1768       | 8620  | activityBasedSearch | Luby             | 1,651          |
| AC3       | 8723     | 1768       | 8620  | activityBasedSearch | Luby             | 1,736          |
| AC3rm     | 8723     | 1768       | 8620  | activityBasedSearch | Luby             | 1,685          |
| AC3bit+rm | 8978     | 4720       | 10599 | activityBasedSearch | Luby             | 1,955          |
| FC        | 10646    | 33634      | 30566 | activityBasedSearch | Luby             | 3,950          |



Πρόβλημα Satellite02 – Λύση σε 12 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails  | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|--------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 140407     | 70214  | Default             | NULL             | 19,608         |
| AC3       | 0        | 140407     | 70214  | Default             | NULL             | 21,336         |
| AC3rm     | 0        | 140407     | 70214  | Default             | NULL             | 20,561         |
| AC3bit+rm | 0        | 126616     | 63345  | Default             | NULL             | 20,715         |
| FC        | 0        | 135979     | 68001  | Default             | NULL             | 17,693         |
| AC2001    | 0        | 190216     | 95146  | intVarSearch        | NULL             | 31,831         |
| AC3       | 0        | 190216     | 95146  | intVarSearch        | NULL             | 34,171         |
| AC3rm     | 0        | 190216     | 95146  | intVarSearch        | NULL             | 32,688         |
| AC3bit+rm | 0        | 186617     | 93321  | intVarSearch        | NULL             | 33,747         |
| FC        | 0        | 218834     | 109429 | intVarSearch        | NULL             | 32,605         |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC2001    | 87       | 90976      | 45833  | Default             | Geometrical      | 12,947         |
| AC3       | 87       | 90976      | 45833  | Default             | Geometrical      | 16,044         |
| AC3rm     | 87       | 90976      | 45833  | Default             | Geometrical      | 17,986         |
| AC3bit+rm | 87       | 65989      | 33338  | Default             | Geometrical      | 12,760         |
| FC        | 86       | 81121      | 40874  | Default             | Geometrical      | 12,998         |
| AC2001    | 85       | 83874      | 42274  | intVarSearch        | Geometrical      | 17,844         |
| AC3       | 85       | 83874      | 42274  | intVarSearch        | Geometrical      | 19,406         |
| AC3rm     | 85       | 83874      | 42274  | intVarSearch        | Geometrical      | 19,626         |
| AC3bit+rm | 84       | 82922      | 41787  | intVarSearch        | Geometrical      | 17,288         |
| FC        | 81       | 66722      | 33659  | intVarSearch        | Geometrical      | 12,153         |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | 7704     | 146730     | 89858  | Default             | Luby             | 33,295         |
| AC3       | 7704     | 146730     | 89858  | Default             | Luby             | 42,562         |
| AC3rm     | 7704     | 146730     | 89858  | Default             | Luby             | 41,564         |
| AC3bit+rm | 7704     | 144349     | 88767  | Default             | Luby             | 42,344         |
| FC        | 7520     | 146745     | 89658  | Default             | Luby             | 34,361         |
| AC2001    | 9193     | 174708     | 107512 | intVarSearch        | Luby             | 48,663         |
| AC3       | 9193     | 174708     | 107512 | intVarSearch        | Luby             | 51,780         |
| AC3rm     | 9193     | 174708     | 107512 | intVarSearch        | Luby             | 52,017         |
| AC3bit+rm | 8922     | 172030     | 105551 | intVarSearch        | Luby             | 48,896         |
| FC        | 8165     | 154559     | 94724  | intVarSearch        | Luby             | 38,066         |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |



Πρόβλημα Satellite03 – Λύση σε 6 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails   | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|---------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 655        | 334     | Default             | NULL             | 0,892          |
| AC3       | 0        | 655        | 334     | Default             | NULL             | 0,905          |
| AC3rm     | 0        | 655        | 334     | Default             | NULL             | 0,880          |
| AC3bit+rm | 0        | 655        | 334     | Default             | NULL             | 0,832          |
| FC        | 0        | 655        | 334     | Default             | NULL             | 0,769          |
| AC2001    | 0        | 699        | 354     | intVarSearch        | NULL             | 0,813          |
| AC3       | 0        | 699        | 354     | intVarSearch        | NULL             | 0,857          |
| AC3rm     | 0        | 699        | 354     | intVarSearch        | NULL             | 1,114          |
| AC3bit+rm | 0        | 699        | 354     | intVarSearch        | NULL             | 0,890          |
| FC        | 0        | 699        | 354     | intVarSearch        | NULL             | 0,793          |
| AC2001    | 22746    | 107631     | 76590   | activityBasedSearch | NULL             | 37,424         |
| AC3       | 22746    | 107631     | 76590   | activityBasedSearch | NULL             | 41,997         |
| AC3rm     | 22746    | 107631     | 76590   | activityBasedSearch | NULL             | 42,747         |
| AC3bit+rm | 22746    | 353288     | 199423  | activityBasedSearch | NULL             | 77,742         |
| FC        | 22647    | 6567116    | 3306251 | activityBasedSearch | NULL             | 794,250        |
| AC2001    | 22       | 1012       | 563     | Default             | Geometrical      | 1,125          |
| AC3       | 22       | 1012       | 563     | Default             | Geometrical      | 1,148          |
| AC3rm     | 22       | 1012       | 563     | Default             | Geometrical      | 1,282          |
| AC3bit+rm | 22       | 1012       | 563     | Default             | Geometrical      | 1,060          |
| FC        | 22       | 1012       | 563     | Default             | Geometrical      | 1,044          |
| AC2001    | 22       | 866        | 492     | intVarSearch        | Geometrical      | 1,111          |
| AC3       | 22       | 866        | 492     | intVarSearch        | Geometrical      | 1,146          |
| AC3rm     | 22       | 866        | 492     | intVarSearch        | Geometrical      | 1,007          |
| AC3bit+rm | 22       | 866        | 492     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,919          |
| FC        | 22       | 866        | 492     | intVarSearch        | Geometrical      | 0,890          |
| AC2001    | 22796    | 29854      | 37710   | activityBasedSearch | Geometrical      | 27,898         |
| AC3       | 22796    | 29854      | 37710   | activityBasedSearch | Geometrical      | 30,107         |
| AC3rm     | 22796    | 29854      | 37710   | activityBasedSearch | Geometrical      | 30,230         |
| AC3bit+rm | 22795    | 14630      | 30085   | activityBasedSearch | Geometrical      | 25,981         |
| FC        | 22702    | 659869     | 352808  | activityBasedSearch | Geometrical      | 76,846         |
| AC2001    | 181      | 1237       | 983     | Default             | Luby             | 1,214          |
| AC3       | 181      | 1237       | 983     | Default             | Luby             | 1,254          |
| AC3rm     | 181      | 1237       | 983     | Default             | Luby             | 1,466          |
| AC3bit+rm | 181      | 1237       | 983     | Default             | Luby             | 1,257          |
| FC        | 181      | 1237       | 983     | Default             | Luby             | 1,199          |
| AC2001    | 191      | 1545       | 1156    | intVarSearch        | Luby             | 1,330          |
| AC3       | 191      | 1545       | 1156    | intVarSearch        | Luby             | 1,553          |
| AC3rm     | 191      | 1545       | 1156    | intVarSearch        | Luby             | 1,490          |
| AC3bit+rm | 191      | 1545       | 1156    | intVarSearch        | Luby             | 1,309          |
| FC        | 191      | 1545       | 1156    | intVarSearch        | Luby             | 1,238          |
| AC2001    | 28691    | 4798805    | 2431540 | activityBasedSearch | Luby             | 568,759        |
| AC3       | 28691    | 4798805    | 2431540 | activityBasedSearch | Luby             | 614,953        |
| AC3rm     | 28691    | 4798805    | 2431540 | activityBasedSearch | Luby             | 569,459        |
| AC3bit+rm | 29638    | 1873743    | 972981  | activityBasedSearch | Luby             | 281,656        |
| FC        | 29539    | 2393910    | 1231866 | activityBasedSearch | Luby             | 310,500        |

Πρόβλημα Satellite04 – Λύση σε 10 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails  | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|--------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 319177     | 159598 | Default             | NULL             | 71,878         |
| AC3       | 0        | 319177     | 159598 | Default             | NULL             | 80,510         |
| AC3rm     | 0        | 319177     | 159598 | Default             | NULL             | 76,259         |
| AC3bit+rm | 0        | 319177     | 159598 | Default             | NULL             | 82,001         |
| FC        | 0        | 204196     | 102156 | Default             | NULL             | 45,507         |
| AC2001    | 0        | 442228     | 221122 | intVarSearch        | NULL             | 109,328        |
| AC3       | 0        | 442228     | 221122 | intVarSearch        | NULL             | 121,432        |
| AC3rm     | 0        | 442228     | 221122 | intVarSearch        | NULL             | 121,691        |
| AC3bit+rm | 0        | 442228     | 221122 | intVarSearch        | NULL             | 124,396        |
| FC        | 0        | 773947     | 386986 | intVarSearch        | NULL             | 167,907        |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC2001    | 56       | 55960      | 28183  | Default             | Geometrical      | 11,102         |
| AC3       | 56       | 55960      | 28183  | Default             | Geometrical      | 12,251         |
| AC3rm     | 56       | 55960      | 28183  | Default             | Geometrical      | 12,039         |
| AC3bit+rm | 56       | 55960      | 28183  | Default             | Geometrical      | 12,187         |
| FC        | 56       | 55900      | 28149  | Default             | Geometrical      | 10,121         |
| AC2001    | 54       | 57271      | 28811  | intVarSearch        | Geometrical      | 12,965         |
| AC3       | 54       | 57271      | 28811  | intVarSearch        | Geometrical      | 14,757         |
| AC3rm     | 54       | 57271      | 28811  | intVarSearch        | Geometrical      | 14,516         |
| AC3bit+rm | 54       | 57271      | 28811  | intVarSearch        | Geometrical      | 14,195         |
| FC        | 54       | 57271      | 28811  | intVarSearch        | Geometrical      | 12,490         |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | 2757     | 48561      | 30169  | Default             | Luby             | 15,678         |
| AC3       | 2757     | 48561      | 30169  | Default             | Luby             | 17,606         |
| AC3rm     | 2757     | 48561      | 30169  | Default             | Luby             | 17,079         |
| AC3bit+rm | 2757     | 48561      | 30169  | Default             | Luby             | 17,081         |
| FC        | 2757     | 48561      | 30169  | Default             | Luby             | 15,067         |
| AC2001    | 2859     | 58007      | 35149  | intVarSearch        | Luby             | 20,063         |
| AC3       | 2859     | 58007      | 35149  | intVarSearch        | Luby             | 23,479         |
| AC3rm     | 2859     | 58007      | 35149  | intVarSearch        | Luby             | 22,384         |
| AC3bit+rm | 2859     | 58007      | 35149  | intVarSearch        | Luby             | 21,981         |
| FC        | 2859     | 58007      | 35149  | intVarSearch        | Luby             | 20,073         |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |

Πρόβλημα Satellite05 – Λύση σε 7 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails   | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|---------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 2040286    | 1020153 | Default             | NULL             | 512,564        |
| AC3       | 0        | 2040286    | 1020153 | Default             | NULL             | 630,905        |
| AC3rm     | 0        | 2040286    | 1020153 | Default             | NULL             | 642,112        |
| AC3bit+rm | 0        | 2040286    | 1020153 | Default             | NULL             | 702,844        |
| FC        | 0        | 2309105    | 1154567 | Default             | NULL             | 573,909        |
| AC2001    | 0        | 1683477    | 841752  | intVarSearch        | NULL             | 493,091        |
| AC3       | 0        | 1683477    | 841752  | intVarSearch        | NULL             | 544,300        |
| AC3rm     | 0        | 1683477    | 841752  | intVarSearch        | NULL             | 560,190        |
| AC3bit+rm | 0        | 1683477    | 841752  | intVarSearch        | NULL             | 571,940        |
| FC        | 0        | 1587193    | 793612  | intVarSearch        | NULL             | 423,654        |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC2001    | 60       | 1388695    | 694691  | Default             | Geometrical      | 579,290        |
| AC3       | 60       | 1388695    | 694691  | Default             | Geometrical      | 673,049        |
| AC3rm     | 60       | 1388695    | 694691  | Default             | Geometrical      | 594,371        |
| AC3bit+rm | 60       | 1388695    | 694691  | Default             | Geometrical      | 680,903        |
| FC        | 59       | 833293     | 417001  | Default             | Geometrical      | 285,771        |
| AC2001    | 60       | 1333339    | 667027  | intVarSearch        | Geometrical      | 488,241        |
| AC3       | 60       | 1333339    | 667027  | intVarSearch        | Geometrical      | 607,688        |
| AC3rm     | 60       | 1333339    | 667027  | intVarSearch        | Geometrical      | 625,734        |
| AC3bit+rm | 60       | 1333339    | 667027  | intVarSearch        | Geometrical      | 604,860        |
| FC        | 59       | 500645     | 250662  | intVarSearch        | Geometrical      | 182,760        |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | 6540     | 6818002    | 3423881 | Default             | Luby             | 4228,752       |
| AC3       | 6540     | 6818002    | 3423881 | Default             | Luby             | 4595,149       |
| AC3rm     | 6540     | 6818002    | 3423881 | Default             | Luby             | 4621,700       |
| AC3bit+rm | 6540     | 6818002    | 3423881 | Default             | Luby             | 4611,409       |
| FC        | 6540     | 6818002    | 3423881 | Default             | Luby             | 3534,241       |
| AC2001    | 5013     | 758824     | 391286  | intVarSearch        | Luby             | 500,852        |
| AC3       | 5013     | 758824     | 391286  | intVarSearch        | Luby             | 579,066        |
| AC3rm     | 5013     | 758824     | 391286  | intVarSearch        | Luby             | 539,360        |
| AC3bit+rm | 5013     | 758824     | 391286  | intVarSearch        | Luby             | 556,330        |
| FC        | 5013     | 739610     | 381553  | intVarSearch        | Luby             | 428,081        |
| AC2001    | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---     | activityBasedSearch | Luby             | ---            |

Πρόβλημα Satellite06 – Λύση σε 8 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails    | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|----------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 4598       | 2307     | Default             | NULL             | 2,357          |
| AC3       | 0        | 4598       | 2307     | Default             | NULL             | 2,607          |
| AC3rm     | 0        | 4598       | 2307     | Default             | NULL             | 2,735          |
| AC3bit+rm | 0        | 4598       | 2307     | Default             | NULL             | 2,650          |
| FC        | 0        | 4598       | 2307     | Default             | NULL             | 2,328          |
| AC2001    | 0        | 6676       | 3348     | intVarSearch        | NULL             | 3,356          |
| AC3       | 0        | 6676       | 3348     | intVarSearch        | NULL             | 3,649          |
| AC3rm     | 0        | 6676       | 3348     | intVarSearch        | NULL             | 4,080          |
| AC3bit+rm | 0        | 6676       | 3348     | intVarSearch        | NULL             | 3,656          |
| FC        | 0        | 6676       | 3348     | intVarSearch        | NULL             | 3,242          |
| AC2001    | 253098   | 25802217   | 13154278 | activityBasedSearch | NULL             | 7967,040       |
| AC3       | 253098   | 25802217   | 13154278 | activityBasedSearch | NULL             | 10968,825      |
| AC3rm     | 253098   | 25802217   | 13154278 | activityBasedSearch | NULL             | 9820,057       |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | 251426   | 4021400    | 2262161  | activityBasedSearch | NULL             | 2374,368       |
| AC2001    | 35       | 7458       | 3825     | Default             | Geometrical      | 3,768          |
| AC3       | 35       | 7458       | 3825     | Default             | Geometrical      | 4,255          |
| AC3rm     | 35       | 7458       | 3825     | Default             | Geometrical      | 4,340          |
| AC3bit+rm | 35       | 7458       | 3825     | Default             | Geometrical      | 4,360          |
| FC        | 35       | 7458       | 3825     | Default             | Geometrical      | 3,831          |
| AC2001    | 35       | 7571       | 3890     | intVarSearch        | Geometrical      | 4,160          |
| AC3       | 35       | 7571       | 3890     | intVarSearch        | Geometrical      | 4,556          |
| AC3rm     | 35       | 7571       | 3890     | intVarSearch        | Geometrical      | 4,753          |
| AC3bit+rm | 35       | 7571       | 3890     | intVarSearch        | Geometrical      | 4,503          |
| FC        | 35       | 7571       | 3890     | intVarSearch        | Geometrical      | 4,191          |
| AC2001    | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---      | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | 2290     | 37092      | 23129    | Default             | Luby             | 28,795         |
| AC3       | 2290     | 37092      | 23129    | Default             | Luby             | 29,316         |
| AC3rm     | 2290     | 37092      | 23129    | Default             | Luby             | 31,884         |
| AC3bit+rm | 2290     | 37092      | 23129    | Default             | Luby             | 32,464         |
| FC        | 2290     | 37092      | 23129    | Default             | Luby             | 27,893         |
| AC2001    | 2311     | 37568      | 23486    | intVarSearch        | Luby             | 30,960         |
| AC3       | 2311     | 37568      | 23486    | intVarSearch        | Luby             | 32,509         |
| AC3rm     | 2311     | 37568      | 23486    | intVarSearch        | Luby             | 35,791         |
| AC3bit+rm | 2311     | 37568      | 23486    | intVarSearch        | Luby             | 34,826         |
| FC        | 2311     | 37568      | 23486    | intVarSearch        | Luby             | 30,406         |
| AC2001    | 265098   | 30585172   | 15545716 | activityBasedSearch | Luby             | 12981,769      |
| AC3       | 265098   | 30585172   | 15545716 | activityBasedSearch | Luby             | 14780,700      |
| AC3rm     | 265098   | 30585172   | 15545716 | activityBasedSearch | Luby             | 14755,643      |
| AC3bit+rm | 265098   | 19169240   | 9837756  | activityBasedSearch | Luby             | 6019,571       |
| FC        | 263426   | 41791366   | 21147227 | activityBasedSearch | Luby             | 9173,197       |

Πρόβλημα Satellite07 – Λύση σε 6 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails  | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|--------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 638685     | 319353 | Default             | NULL             | 302,122        |
| AC3       | 0        | 638685     | 319353 | Default             | NULL             | 333,646        |
| AC3rm     | 0        | 638685     | 319353 | Default             | NULL             | 329,883        |
| AC3bit+rm | 0        | 638685     | 319353 | Default             | NULL             | 324,925        |
| FC        | 0        | 366495     | 183268 | Default             | NULL             | 155,656        |
| AC2001    | 0        | 431126     | 215581 | intVarSearch        | NULL             | 222,498        |
| AC3       | 0        | 431126     | 215581 | intVarSearch        | NULL             | 244,818        |
| AC3rm     | 0        | 431126     | 215581 | intVarSearch        | NULL             | 269,828        |
| AC3bit+rm | 0        | 431126     | 215581 | intVarSearch        | NULL             | 252,329        |
| FC        | 0        | 495195     | 247607 | intVarSearch        | NULL             | 235,607        |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | NULL             | ---            |
| AC2001    | 40       | 172891     | 86626  | Default             | Geometrical      | 73,393         |
| AC3       | 40       | 172891     | 86626  | Default             | Geometrical      | 84,230         |
| AC3rm     | 40       | 172891     | 86626  | Default             | Geometrical      | 88,567         |
| AC3bit+rm | 40       | 172891     | 86626  | Default             | Geometrical      | 88,696         |
| FC        | 40       | 172891     | 86626  | Default             | Geometrical      | 72,927         |
| AC2001    | 40       | 118952     | 59659  | intVarSearch        | Geometrical      | 53,771         |
| AC3       | 40       | 118952     | 59659  | intVarSearch        | Geometrical      | 59,156         |
| AC3rm     | 40       | 118952     | 59659  | intVarSearch        | Geometrical      | 59,108         |
| AC3bit+rm | 40       | 118952     | 59659  | intVarSearch        | Geometrical      | 58,090         |
| FC        | 40       | 118952     | 59659  | intVarSearch        | Geometrical      | 52,076         |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Geometrical      | ---            |
| AC2001    | 4539     | 141951     | 80548  | Default             | Luby             | 93,607         |
| AC3       | 4539     | 141951     | 80548  | Default             | Luby             | 107,175        |
| AC3rm     | 4539     | 141951     | 80548  | Default             | Luby             | 104,884        |
| AC3bit+rm | 4539     | 141951     | 80548  | Default             | Luby             | 109,845        |
| FC        | 4072     | 125987     | 71586  | Default             | Luby             | 80,280         |
| AC2001    | 3924     | 108572     | 62665  | intVarSearch        | Luby             | 79,624         |
| AC3       | 3924     | 108572     | 62665  | intVarSearch        | Luby             | 82,648         |
| AC3rm     | 3924     | 108572     | 62665  | intVarSearch        | Luby             | 87,588         |
| AC3bit+rm | 3924     | 108572     | 62665  | intVarSearch        | Luby             | 83,727         |
| FC        | 3924     | 108572     | 62665  | intVarSearch        | Luby             | 74,211         |
| AC2001    | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3       | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3rm     | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| AC3bit+rm | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |
| FC        | ---      | ---        | ---    | activityBasedSearch | Luby             | ---            |

Πρόβλημα Freecell01 – Λύση σε 5 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails  | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|--------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 6317       | 3176   | Default             | NULL             | 4,155          |
| AC3       | 0        | 6317       | 3176   | Default             | NULL             | 4,271          |
| AC3rm     | 0        | 6317       | 3176   | Default             | NULL             | 4,437          |
| AC3bit+rm | 0        | 8278       | 4169   | Default             | NULL             | 4,696          |
| FC        | 0        | 5194       | 2611   | Default             | NULL             | 2,780          |
| AC2001    | 0        | 9805       | 4914   | intVarSearch        | NULL             | 5,052          |
| AC3       | 0        | 9805       | 4914   | intVarSearch        | NULL             | 5,312          |
| AC3rm     | 0        | 9805       | 4914   | intVarSearch        | NULL             | 5,526          |
| AC3bit+rm | 0        | 9805       | 4914   | intVarSearch        | NULL             | 4,970          |
| FC        | 0        | 5202       | 2626   | intVarSearch        | NULL             | 2,548          |
| AC2001    | 8569     | 58545      | 37868  | activityBasedSearch | NULL             | 36,547         |
| AC3       | 8569     | 58545      | 37868  | activityBasedSearch | NULL             | 43,117         |
| AC3rm     | 8569     | 58545      | 37868  | activityBasedSearch | NULL             | 43,459         |
| AC3bit+rm | 8569     | 61858      | 39515  | activityBasedSearch | NULL             | 39,184         |
| FC        | 8588     | 69383      | 43344  | activityBasedSearch | NULL             | 34,255         |
| AC2001    | 26       | 7347       | 3833   | Default             | Geometrical      | 4,241          |
| AC3       | 26       | 7347       | 3833   | Default             | Geometrical      | 4,454          |
| AC3rm     | 26       | 7347       | 3833   | Default             | Geometrical      | 4,557          |
| AC3bit+rm | 28       | 10512      | 5440   | Default             | Geometrical      | 4,815          |
| FC        | 24       | 4256       | 2291   | Default             | Geometrical      | 2,371          |
| AC2001    | 26       | 8291       | 4390   | intVarSearch        | Geometrical      | 4,851          |
| AC3       | 26       | 8291       | 4390   | intVarSearch        | Geometrical      | 5,339          |
| AC3rm     | 26       | 8291       | 4390   | intVarSearch        | Geometrical      | 5,500          |
| AC3bit+rm | 26       | 8299       | 4394   | intVarSearch        | Geometrical      | 4,841          |
| FC        | 24       | 5641       | 2987   | intVarSearch        | Geometrical      | 2,750          |
| AC2001    | 8605     | 56417      | 36885  | activityBasedSearch | Geometrical      | 34,410         |
| AC3       | 8605     | 56417      | 36885  | activityBasedSearch | Geometrical      | 40,906         |
| AC3rm     | 8605     | 56417      | 36885  | activityBasedSearch | Geometrical      | 43,419         |
| AC3bit+rm | 8606     | 104355     | 60931  | activityBasedSearch | Geometrical      | 56,587         |
| FC        | 8628     | 127703     | 72690  | activityBasedSearch | Geometrical      | 53,536         |
| AC2001    | 3052     | 55889      | 35934  | Default             | Luby             | 44,926         |
| AC3       | 3052     | 55889      | 35934  | Default             | Luby             | 44,725         |
| AC3rm     | 3052     | 55889      | 35934  | Default             | Luby             | 45,536         |
| AC3bit+rm | 3052     | 52913      | 34410  | Default             | Luby             | 39,052         |
| FC        | 2144     | 34450      | 22758  | Default             | Luby             | 20,739         |
| AC2001    | 2226     | 37728      | 24396  | intVarSearch        | Luby             | 26,074         |
| AC3       | 2226     | 37728      | 24396  | intVarSearch        | Luby             | 29,178         |
| AC3rm     | 2226     | 37728      | 24396  | intVarSearch        | Luby             | 28,470         |
| AC3bit+rm | 2226     | 37728      | 24396  | intVarSearch        | Luby             | 25,754         |
| FC        | 2021     | 54792      | 32604  | intVarSearch        | Luby             | 22,605         |
| AC2001    | 13123    | 64400      | 50880  | activityBasedSearch | Luby             | 58,096         |
| AC3       | 13123    | 64400      | 50880  | activityBasedSearch | Luby             | 69,707         |
| AC3rm     | 13123    | 64400      | 50880  | activityBasedSearch | Luby             | 69,333         |
| AC3bit+rm | 13123    | 71173      | 54092  | activityBasedSearch | Luby             | 65,389         |
| FC        | 13138    | 169618     | 103567 | activityBasedSearch | Luby             | 81,866         |

Πρόβλημα DriverLog01 – Λύση σε 6 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 1642       | 837   | Default             | NULL             | 0,346          |
| AC3       | 0        | 1642       | 837   | Default             | NULL             | 0,329          |
| AC3rm     | 0        | 1642       | 837   | Default             | NULL             | 0,380          |
| AC3bit+rm | 0        | 1642       | 837   | Default             | NULL             | 0,339          |
| FC        | 0        | 3303       | 1660  | Default             | NULL             | 0,382          |
| AC2001    | 0        | 1765       | 904   | intVarSearch        | NULL             | 0,337          |
| AC3       | 0        | 1765       | 904   | intVarSearch        | NULL             | 0,351          |
| AC3rm     | 0        | 1765       | 904   | intVarSearch        | NULL             | 0,330          |
| AC3bit+rm | 0        | 2113       | 1078  | intVarSearch        | NULL             | 0,355          |
| FC        | 0        | 4396       | 2208  | intVarSearch        | NULL             | 0,408          |
| AC2001    | 3251     | 36177      | 21353 | activityBasedSearch | NULL             | 2,246          |
| AC3       | 3251     | 36177      | 21353 | activityBasedSearch | NULL             | 2,363          |
| AC3rm     | 3251     | 36177      | 21353 | activityBasedSearch | NULL             | 2,305          |
| AC3bit+rm | 3251     | 5874       | 6197  | activityBasedSearch | NULL             | 1,224          |
| FC        | 3253     | 14117      | 10329 | activityBasedSearch | NULL             | 1,528          |
| AC2001    | 27       | 3524       | 1850  | Default             | Geometrical      | 0,483          |
| AC3       | 27       | 3524       | 1850  | Default             | Geometrical      | 0,467          |
| AC3rm     | 27       | 3524       | 1850  | Default             | Geometrical      | 0,466          |
| AC3bit+rm | 26       | 2175       | 1171  | Default             | Geometrical      | 0,385          |
| FC        | 30       | 6142       | 3196  | Default             | Geometrical      | 0,515          |
| AC2001    | 26       | 2283       | 1239  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,372          |
| AC3       | 26       | 2283       | 1239  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,368          |
| AC3rm     | 26       | 2283       | 1239  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,475          |
| AC3bit+rm | 30       | 6282       | 3278  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,530          |
| FC        | 30       | 4455       | 2360  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,445          |
| AC2001    | 3301     | 14503      | 10573 | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,547          |
| AC3       | 3301     | 14503      | 10573 | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,691          |
| AC3rm     | 3301     | 14503      | 10573 | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,666          |
| AC3bit+rm | 3302     | 14217      | 10420 | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,568          |
| FC        | 3294     | 13225      | 9916  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,517          |
| AC2001    | 1180     | 14530      | 9963  | Default             | Luby             | 1,324          |
| AC3       | 1180     | 14530      | 9963  | Default             | Luby             | 1,359          |
| AC3rm     | 1180     | 14530      | 9963  | Default             | Luby             | 1,473          |
| AC3bit+rm | 670      | 7987       | 5525  | Default             | Luby             | 0,852          |
| FC        | 814      | 9555       | 6441  | Default             | Luby             | 0,865          |
| AC2001    | 1307     | 16979      | 11621 | intVarSearch        | Luby             | 1,486          |
| AC3       | 1307     | 16979      | 11621 | intVarSearch        | Luby             | 1,513          |
| AC3rm     | 1307     | 16979      | 11621 | intVarSearch        | Luby             | 1,477          |
| AC3bit+rm | 1206     | 15782      | 10620 | intVarSearch        | Luby             | 1,419          |
| FC        | 1197     | 16405      | 10773 | intVarSearch        | Luby             | 1,246          |
| AC2001    | 5205     | 18670      | 16302 | activityBasedSearch | Luby             | 2,327          |
| AC3       | 5205     | 18670      | 16302 | activityBasedSearch | Luby             | 2,562          |
| AC3rm     | 5205     | 18670      | 16302 | activityBasedSearch | Luby             | 2,502          |
| AC3bit+rm | 5206     | 18815      | 16575 | activityBasedSearch | Luby             | 2,451          |
| FC        | 4859     | 14793      | 13624 | activityBasedSearch | Luby             | 2,131          |



Πρόβλημα DriverLog02 – Λύση σε 9 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails   | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|---------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 533687     | 266856  | Default             | NULL             | 23,413         |
| AC3       | 0        | 533687     | 266856  | Default             | NULL             | 24,969         |
| AC3rm     | 0        | 533687     | 266856  | Default             | NULL             | 23,599         |
| AC3bit+rm | 0        | 1741379    | 870704  | Default             | NULL             | 82,644         |
| FC        | 0        | 1769392    | 884714  | Default             | NULL             | 76,533         |
| AC2001    | 0        | 1642147    | 821086  | intVarSearch        | NULL             | 66,152         |
| AC3       | 0        | 1642147    | 821086  | intVarSearch        | NULL             | 68,733         |
| AC3rm     | 0        | 1642147    | 821086  | intVarSearch        | NULL             | 64,104         |
| AC3bit+rm | 0        | 3023604    | 1511826 | intVarSearch        | NULL             | 129,537        |
| FC        | 0        | 1170239    | 585144  | intVarSearch        | NULL             | 44,273         |
| AC2001    | 7504     | 437360     | 226201  | activityBasedSearch | NULL             | 20,723         |
| AC3       | 7504     | 437360     | 226201  | activityBasedSearch | NULL             | 22,781         |
| AC3rm     | 7504     | 437360     | 226201  | activityBasedSearch | NULL             | 22,009         |
| AC3bit+rm | 7509     | 1787838    | 901466  | activityBasedSearch | NULL             | 81,711         |
| FC        | 7534     | 2731234    | 1373174 | activityBasedSearch | NULL             | 118,580        |
| AC2001    | 59       | 326893     | 163813  | Default             | Geometrical      | 15,510         |
| AC3       | 59       | 326893     | 163813  | Default             | Geometrical      | 16,189         |
| AC3rm     | 59       | 326893     | 163813  | Default             | Geometrical      | 15,517         |
| AC3bit+rm | 60       | 149164     | 74970   | Default             | Geometrical      | 7,179          |
| FC        | 62       | 6787280    | 3394122 | Default             | Geometrical      | 270,134        |
| AC2001    | 67       | 246639     | 123755  | intVarSearch        | Geometrical      | 10,661         |
| AC3       | 67       | 246639     | 123755  | intVarSearch        | Geometrical      | 10,724         |
| AC3rm     | 67       | 246639     | 123755  | intVarSearch        | Geometrical      | 10,665         |
| AC3bit+rm | 59       | 91258      | 45985   | intVarSearch        | Geometrical      | 4,811          |
| FC        | 57       | 265926     | 133341  | intVarSearch        | Geometrical      | 12,320         |
| AC2001    | 7586     | 4041287    | 2028522 | activityBasedSearch | Geometrical      | 160,922        |
| AC3       | 7586     | 4041287    | 2028522 | activityBasedSearch | Geometrical      | 175,369        |
| AC3rm     | 7586     | 4041287    | 2028522 | activityBasedSearch | Geometrical      | 174,406        |
| AC3bit+rm | 7591     | 3922247    | 1969044 | activityBasedSearch | Geometrical      | 164,640        |
| FC        | 7632     | 3984665    | 2000244 | activityBasedSearch | Geometrical      | 157,970        |
| AC2001    | 4794     | 1240630    | 631100  | Default             | Luby             | 58,158         |
| AC3       | 4794     | 1240630    | 631100  | Default             | Luby             | 63,696         |
| AC3rm     | 4794     | 1240630    | 631100  | Default             | Luby             | 61,498         |
| AC3bit+rm | 6542     | 576320     | 302937  | Default             | Luby             | 35,257         |
| FC        | 9027     | 287303     | 164533  | Default             | Luby             | 17,086         |
| AC2001    | 6573     | 167152     | 98382   | intVarSearch        | Luby             | 13,630         |
| AC3       | 6573     | 167152     | 98382   | intVarSearch        | Luby             | 14,722         |
| AC3rm     | 6573     | 167152     | 98382   | intVarSearch        | Luby             | 14,166         |
| AC3bit+rm | 6605     | 320388     | 175530  | intVarSearch        | Luby             | 20,931         |
| FC        | 7045     | 329454     | 181194  | intVarSearch        | Luby             | 18,569         |
| AC2001    | 16232    | 2110367    | 1081691 | activityBasedSearch | Luby             | 99,186         |
| AC3       | 16232    | 2110367    | 1081691 | activityBasedSearch | Luby             | 109,251        |
| AC3rm     | 16232    | 2110367    | 1081691 | activityBasedSearch | Luby             | 104,913        |
| AC3bit+rm | 16236    | 1033615    | 542967  | activityBasedSearch | Luby             | 52,854         |
| FC        | 16341    | 2962150    | 1506671 | activityBasedSearch | Luby             | 107,617        |



Πρόβλημα DriverLog03 – Λύση σε 7 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails  | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|--------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 7581       | 3803   | Default             | NULL             | 0,670          |
| AC3       | 0        | 7581       | 3803   | Default             | NULL             | 0,678          |
| AC3rm     | 0        | 7581       | 3803   | Default             | NULL             | 0,751          |
| AC3bit+rm | 0        | 5136       | 2580   | Default             | NULL             | 0,520          |
| FC        | 0        | 4465       | 2242   | Default             | NULL             | 0,474          |
| AC2001    | 0        | 4528       | 2280   | intVarSearch        | NULL             | 0,485          |
| AC3       | 0        | 4528       | 2280   | intVarSearch        | NULL             | 0,486          |
| AC3rm     | 0        | 4528       | 2280   | intVarSearch        | NULL             | 0,533          |
| AC3bit+rm | 0        | 4906       | 2470   | intVarSearch        | NULL             | 0,501          |
| FC        | 0        | 2787       | 1403   | intVarSearch        | NULL             | 0,440          |
| AC2001    | 8255     | 50934      | 33739  | activityBasedSearch | NULL             | 4,949          |
| AC3       | 8255     | 50934      | 33739  | activityBasedSearch | NULL             | 5,262          |
| AC3rm     | 8255     | 50934      | 33739  | activityBasedSearch | NULL             | 5,129          |
| AC3bit+rm | 8260     | 40867      | 28714  | activityBasedSearch | NULL             | 4,946          |
| FC        | 8427     | 7857       | 12385  | activityBasedSearch | NULL             | 3,425          |
| AC2001    | 27       | 3440       | 1821   | Default             | Geometrical      | 0,517          |
| AC3       | 27       | 3440       | 1821   | Default             | Geometrical      | 0,478          |
| AC3rm     | 27       | 3440       | 1821   | Default             | Geometrical      | 0,557          |
| AC3bit+rm | 28       | 3876       | 2038   | Default             | Geometrical      | 0,572          |
| FC        | 31       | 6974       | 3613   | Default             | Geometrical      | 0,652          |
| AC2001    | 26       | 2411       | 1316   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,447          |
| AC3       | 26       | 2411       | 1316   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,444          |
| AC3rm     | 26       | 2411       | 1316   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,521          |
| AC3bit+rm | 29       | 5230       | 2755   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,642          |
| FC        | 29       | 5593       | 2928   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,562          |
| AC2001    | 8304     | 82396      | 49588  | activityBasedSearch | Geometrical      | 6,823          |
| AC3       | 8304     | 82396      | 49588  | activityBasedSearch | Geometrical      | 7,177          |
| AC3rm     | 8304     | 82396      | 49588  | activityBasedSearch | Geometrical      | 7,162          |
| AC3bit+rm | 8306     | 25078      | 20857  | activityBasedSearch | Geometrical      | 4,309          |
| FC        | 8476     | 213425     | 115246 | activityBasedSearch | Geometrical      | 10,562         |
| AC2001    | 794      | 9034       | 6257   | Default             | Luby             | 1,187          |
| AC3       | 794      | 9034       | 6257   | Default             | Luby             | 1,230          |
| AC3rm     | 794      | 9034       | 6257   | Default             | Luby             | 1,242          |
| AC3bit+rm | 826      | 9338       | 6462   | Default             | Luby             | 1,227          |
| FC        | 827      | 10159      | 6834   | Default             | Luby             | 1,198          |
| AC2001    | 1116     | 15237      | 10235  | intVarSearch        | Luby             | 1,612          |
| AC3       | 1116     | 15237      | 10235  | intVarSearch        | Luby             | 1,679          |
| AC3rm     | 1116     | 15237      | 10235  | intVarSearch        | Luby             | 1,640          |
| AC3bit+rm | 1116     | 15450      | 10339  | intVarSearch        | Luby             | 1,612          |
| FC        | 699      | 8652       | 5809   | intVarSearch        | Luby             | 1,075          |
| AC2001    | 12066    | 74087      | 52112  | activityBasedSearch | Luby             | 7,551          |
| AC3       | 12066    | 74087      | 52112  | activityBasedSearch | Luby             | 7,927          |
| AC3rm     | 12066    | 74087      | 52112  | activityBasedSearch | Luby             | 7,852          |
| AC3bit+rm | 11561    | 94109      | 60230  | activityBasedSearch | Luby             | 8,190          |
| FC        | 10868    | 20282      | 21699  | activityBasedSearch | Luby             | 4,391          |

Πρόβλημα DriverLog04 – Λύση σε 7 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails  | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|--------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 5090       | 2559   | Default             | NULL             | 0,613          |
| AC3       | 0        | 5090       | 2559   | Default             | NULL             | 0,617          |
| AC3rm     | 0        | 5090       | 2559   | Default             | NULL             | 0,626          |
| AC3bit+rm | 0        | 5710       | 2869   | Default             | NULL             | 0,618          |
| FC        | 0        | 4527       | 2277   | Default             | NULL             | 0,555          |
| AC2001    | 0        | 9267       | 4658   | intVarSearch        | NULL             | 0,725          |
| AC3       | 0        | 9267       | 4658   | intVarSearch        | NULL             | 0,789          |
| AC3rm     | 0        | 9267       | 4658   | intVarSearch        | NULL             | 0,794          |
| AC3bit+rm | 0        | 15887      | 7964   | intVarSearch        | NULL             | 1,061          |
| FC        | 0        | 4991       | 2510   | intVarSearch        | NULL             | 0,564          |
| AC2001    | 4778     | 151583     | 80584  | activityBasedSearch | NULL             | 8,721          |
| AC3       | 4778     | 151583     | 80584  | activityBasedSearch | NULL             | 9,524          |
| AC3rm     | 4778     | 151583     | 80584  | activityBasedSearch | NULL             | 9,264          |
| AC3bit+rm | 4778     | 533311     | 271460 | activityBasedSearch | NULL             | 22,053         |
| FC        | 4800     | 531881     | 270774 | activityBasedSearch | NULL             | 23,704         |
| AC2001    | 35       | 29335      | 14857  | Default             | Geometrical      | 1,937          |
| AC3       | 35       | 29335      | 14857  | Default             | Geometrical      | 1,956          |
| AC3rm     | 35       | 29335      | 14857  | Default             | Geometrical      | 1,867          |
| AC3bit+rm | 30       | 7175       | 3729   | Default             | Geometrical      | 0,685          |
| FC        | 29       | 5928       | 3072   | Default             | Geometrical      | 0,617          |
| AC2001    | 28       | 14594      | 7410   | intVarSearch        | Geometrical      | 1,071          |
| AC3       | 28       | 14594      | 7410   | intVarSearch        | Geometrical      | 1,083          |
| AC3rm     | 28       | 14594      | 7410   | intVarSearch        | Geometrical      | 1,076          |
| AC3bit+rm | 28       | 6951       | 3576   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,696          |
| FC        | 26       | 5481       | 2852   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,632          |
| AC2001    | 4831     | 459305     | 234615 | activityBasedSearch | Geometrical      | 19,125         |
| AC3       | 4831     | 459305     | 234615 | activityBasedSearch | Geometrical      | 20,783         |
| AC3rm     | 4831     | 459305     | 234615 | activityBasedSearch | Geometrical      | 20,364         |
| AC3bit+rm | 4828     | 139988     | 74890  | activityBasedSearch | Geometrical      | 8,373          |
| FC        | 4850     | 77941      | 43915  | activityBasedSearch | Geometrical      | 5,357          |
| AC2001    | 220      | 1480       | 1191   | Default             | Luby             | 0,590          |
| AC3       | 220      | 1480       | 1191   | Default             | Luby             | 0,631          |
| AC3rm     | 220      | 1480       | 1191   | Default             | Luby             | 0,605          |
| AC3bit+rm | 606      | 6317       | 4432   | Default             | Luby             | 1,132          |
| FC        | 2127     | 35111      | 21848  | Default             | Luby             | 3,572          |
| AC2001    | 953      | 9698       | 6899   | intVarSearch        | Luby             | 1,457          |
| AC3       | 953      | 9698       | 6899   | intVarSearch        | Luby             | 1,642          |
| AC3rm     | 953      | 9698       | 6899   | intVarSearch        | Luby             | 1,608          |
| AC3bit+rm | 478      | 4957       | 3481   | intVarSearch        | Luby             | 0,965          |
| FC        | 2097     | 30641      | 19894  | intVarSearch        | Luby             | 3,454          |
| AC2001    | 11024    | 229889     | 133445 | activityBasedSearch | Luby             | 16,451         |
| AC3       | 11024    | 229889     | 133445 | activityBasedSearch | Luby             | 17,508         |
| AC3rm     | 11024    | 229889     | 133445 | activityBasedSearch | Luby             | 17,283         |
| AC3bit+rm | 11024    | 364414     | 200410 | activityBasedSearch | Luby             | 22,856         |
| FC        | 11019    | 314334     | 175230 | activityBasedSearch | Luby             | 19,297         |

Πρόβλημα DriverLog05 – Λύση σε 8 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails  | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|--------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 20481      | 10264  | Default             | NULL             | 1,800          |
| AC3       | 0        | 20481      | 10264  | Default             | NULL             | 1,893          |
| AC3rm     | 0        | 20481      | 10264  | Default             | NULL             | 1,844          |
| AC3bit+rm | 0        | 16064      | 8052   | Default             | NULL             | 1,503          |
| FC        | 0        | 2300       | 1170   | Default             | NULL             | 0,521          |
| AC2001    | 0        | 15880      | 7958   | intVarSearch        | NULL             | 1,444          |
| AC3       | 0        | 15880      | 7958   | intVarSearch        | NULL             | 1,573          |
| AC3rm     | 0        | 15880      | 7958   | intVarSearch        | NULL             | 1,567          |
| AC3bit+rm | 0        | 20945      | 10495  | intVarSearch        | NULL             | 1,821          |
| FC        | 0        | 2904       | 1479   | intVarSearch        | NULL             | 0,613          |
| AC2001    | 5555     | 244323     | 127735 | activityBasedSearch | NULL             | 16,876         |
| AC3       | 5555     | 244323     | 127735 | activityBasedSearch | NULL             | 17,334         |
| AC3rm     | 5555     | 244323     | 127735 | activityBasedSearch | NULL             | 17,434         |
| AC3bit+rm | 5555     | 1283912    | 647528 | activityBasedSearch | NULL             | 88,307         |
| FC        | 5552     | 25777      | 18456  | activityBasedSearch | NULL             | 5,179          |
| AC2001    | 30       | 6349       | 3303   | Default             | Geometrical      | 0,867          |
| AC3       | 30       | 6349       | 3303   | Default             | Geometrical      | 0,935          |
| AC3rm     | 30       | 6349       | 3303   | Default             | Geometrical      | 0,928          |
| AC3bit+rm | 31       | 11597      | 5936   | Default             | Geometrical      | 1,287          |
| FC        | 31       | 25576      | 12917  | Default             | Geometrical      | 2,012          |
| AC2001    | 35       | 37691      | 19041  | intVarSearch        | Geometrical      | 2,982          |
| AC3       | 35       | 37691      | 19041  | intVarSearch        | Geometrical      | 3,103          |
| AC3rm     | 35       | 37691      | 19041  | intVarSearch        | Geometrical      | 3,041          |
| AC3bit+rm | 32       | 17412      | 8835   | intVarSearch        | Geometrical      | 1,720          |
| FC        | 31       | 20951      | 10628  | intVarSearch        | Geometrical      | 1,746          |
| AC2001    | 5599     | 32898      | 22044  | activityBasedSearch | Geometrical      | 5,862          |
| AC3       | 5599     | 32898      | 22044  | activityBasedSearch | Geometrical      | 6,170          |
| AC3rm     | 5599     | 32898      | 22044  | activityBasedSearch | Geometrical      | 6,168          |
| AC3bit+rm | 5599     | 27446      | 19337  | activityBasedSearch | Geometrical      | 5,338          |
| FC        | 5595     | 17404      | 14290  | activityBasedSearch | Geometrical      | 4,745          |
| AC2001    | 1312     | 17728      | 11656  | Default             | Luby             | 2,923          |
| AC3       | 1312     | 17728      | 11656  | Default             | Luby             | 3,299          |
| AC3rm     | 1312     | 17728      | 11656  | Default             | Luby             | 3,128          |
| AC3bit+rm | 1823     | 25571      | 16690  | Default             | Luby             | 3,995          |
| FC        | 1150     | 12745      | 8872   | Default             | Luby             | 2,286          |
| AC2001    | 2385     | 34630      | 22976  | intVarSearch        | Luby             | 4,921          |
| AC3       | 2385     | 34630      | 22976  | intVarSearch        | Luby             | 5,246          |
| AC3rm     | 2385     | 34630      | 22976  | intVarSearch        | Luby             | 4,925          |
| AC3bit+rm | 2449     | 36667      | 23980  | intVarSearch        | Luby             | 5,259          |
| FC        | 2577     | 56800      | 33892  | intVarSearch        | Luby             | 6,658          |
| AC2001    | 10929    | 593730     | 313428 | activityBasedSearch | Luby             | 45,837         |
| AC3       | 10929    | 593730     | 313428 | activityBasedSearch | Luby             | 47,324         |
| AC3rm     | 10929    | 593730     | 313428 | activityBasedSearch | Luby             | 47,884         |
| AC3bit+rm | 8880     | 238234     | 130984 | activityBasedSearch | Luby             | 20,347         |
| FC        | 10368    | 677344     | 352925 | activityBasedSearch | Luby             | 45,796         |

Πρόβλημα DriverLog06 – Λύση σε 5 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 52704      | 26365 | Default             | NULL             | 3,758          |
| AC3       | 0        | 52704      | 26365 | Default             | NULL             | 3,949          |
| AC3rm     | 0        | 52704      | 26365 | Default             | NULL             | 3,884          |
| AC3bit+rm | 0        | 53122      | 26573 | Default             | NULL             | 3,972          |
| FC        | 0        | 19515      | 9778  | Default             | NULL             | 1,659          |
| AC2001    | 0        | 46790      | 23422 | intVarSearch        | NULL             | 3,508          |
| AC3       | 0        | 46790      | 23422 | intVarSearch        | NULL             | 3,703          |
| AC3rm     | 0        | 46790      | 23422 | intVarSearch        | NULL             | 3,571          |
| AC3bit+rm | 0        | 38708      | 19365 | intVarSearch        | NULL             | 3,016          |
| FC        | 0        | 12780      | 6404  | intVarSearch        | NULL             | 1,109          |
| AC2001    | 4953     | 43916      | 26942 | activityBasedSearch | NULL             | 5,142          |
| AC3       | 4953     | 43916      | 26942 | activityBasedSearch | NULL             | 5,595          |
| AC3rm     | 4953     | 43916      | 26942 | activityBasedSearch | NULL             | 5,451          |
| AC3bit+rm | 4953     | 20220      | 15086 | activityBasedSearch | NULL             | 3,624          |
| FC        | 4931     | 2842       | 6370  | activityBasedSearch | NULL             | 2,408          |
| AC2001    | 22       | 4093       | 2120  | Default             | Geometrical      | 0,602          |
| AC3       | 22       | 4093       | 2120  | Default             | Geometrical      | 0,568          |
| AC3rm     | 22       | 4093       | 2120  | Default             | Geometrical      | 0,611          |
| AC3bit+rm | 22       | 4292       | 2230  | Default             | Geometrical      | 0,606          |
| FC        | 22       | 4018       | 2104  | Default             | Geometrical      | 0,577          |
| AC2001    | 25       | 7000       | 3634  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,791          |
| AC3       | 25       | 7000       | 3634  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,840          |
| AC3rm     | 25       | 7000       | 3634  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,814          |
| AC3bit+rm | 26       | 7908       | 4080  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,956          |
| FC        | 24       | 6950       | 3587  | intVarSearch        | Geometrical      | 0,700          |
| AC2001    | 4987     | 16965      | 13512 | activityBasedSearch | Geometrical      | 3,095          |
| AC3       | 4987     | 16965      | 13512 | activityBasedSearch | Geometrical      | 3,429          |
| AC3rm     | 4987     | 16965      | 13512 | activityBasedSearch | Geometrical      | 3,470          |
| AC3bit+rm | 4987     | 21026      | 15537 | activityBasedSearch | Geometrical      | 3,493          |
| FC        | 4981     | 22947      | 16511 | activityBasedSearch | Geometrical      | 3,282          |
| AC2001    | 2250     | 32177      | 21260 | Default             | Luby             | 3,697          |
| AC3       | 2250     | 32177      | 21260 | Default             | Luby             | 3,855          |
| AC3rm     | 2250     | 32177      | 21260 | Default             | Luby             | 3,762          |
| AC3bit+rm | 1272     | 16880      | 11333 | Default             | Luby             | 2,374          |
| FC        | 2060     | 30074      | 19998 | Default             | Luby             | 2,707          |
| AC2001    | 1111     | 15715      | 10532 | intVarSearch        | Luby             | 2,098          |
| AC3       | 1111     | 15715      | 10532 | intVarSearch        | Luby             | 2,148          |
| AC3rm     | 1111     | 15715      | 10532 | intVarSearch        | Luby             | 2,149          |
| AC3bit+rm | 1111     | 15284      | 10261 | intVarSearch        | Luby             | 2,105          |
| FC        | 2187     | 32130      | 21263 | intVarSearch        | Luby             | 3,024          |
| AC2001    | 7530     | 29662      | 25221 | activityBasedSearch | Luby             | 5,597          |
| AC3       | 7530     | 29662      | 25221 | activityBasedSearch | Luby             | 5,964          |
| AC3rm     | 7530     | 29662      | 25221 | activityBasedSearch | Luby             | 5,887          |
| AC3bit+rm | 7755     | 34118      | 27602 | activityBasedSearch | Luby             | 6,202          |
| FC        | 7646     | 27760      | 23896 | activityBasedSearch | Luby             | 4,949          |

Πρόβλημα DriverLog07 – Λύση σε 6 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails   | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|---------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 211488     | 105763  | Default             | NULL             | 15,898         |
| AC3       | 0        | 211488     | 105763  | Default             | NULL             | 16,912         |
| AC3rm     | 0        | 211488     | 105763  | Default             | NULL             | 16,517         |
| AC3bit+rm | 0        | 111953     | 55993   | Default             | NULL             | 9,531          |
| FC        | 0        | 98154      | 49089   | Default             | NULL             | 7,195          |
| AC2001    | 0        | 36417      | 18228   | intVarSearch        | NULL             | 3,208          |
| AC3       | 0        | 36417      | 18228   | intVarSearch        | NULL             | 3,347          |
| AC3rm     | 0        | 36417      | 18228   | intVarSearch        | NULL             | 3,354          |
| AC3bit+rm | 0        | 38961      | 19504   | intVarSearch        | NULL             | 3,300          |
| FC        | 0        | 74552      | 37295   | intVarSearch        | NULL             | 5,663          |
| AC2001    | 8102     | 605735     | 311002  | activityBasedSearch | NULL             | 48,383         |
| AC3       | 8102     | 605735     | 311002  | activityBasedSearch | NULL             | 51,700         |
| AC3rm     | 8102     | 605735     | 311002  | activityBasedSearch | NULL             | 50,723         |
| AC3bit+rm | 8102     | 184841     | 100565  | activityBasedSearch | NULL             | 20,014         |
| FC        | 8227     | 2050950    | 1033735 | activityBasedSearch | NULL             | 173,361        |
| AC2001    | 31       | 52427      | 26426   | Default             | Geometrical      | 4,281          |
| AC3       | 31       | 52427      | 26426   | Default             | Geometrical      | 4,571          |
| AC3rm     | 31       | 52427      | 26426   | Default             | Geometrical      | 4,434          |
| AC3bit+rm | 32       | 120184     | 60322   | Default             | Geometrical      | 10,484         |
| FC        | 30       | 91091      | 45736   | Default             | Geometrical      | 6,912          |
| AC2001    | 30       | 50614      | 25529   | intVarSearch        | Geometrical      | 4,089          |
| AC3       | 30       | 50614      | 25529   | intVarSearch        | Geometrical      | 4,262          |
| AC3rm     | 30       | 50614      | 25529   | intVarSearch        | Geometrical      | 4,131          |
| AC3bit+rm | 30       | 56318      | 28355   | intVarSearch        | Geometrical      | 4,810          |
| FC        | 28       | 32889      | 16615   | intVarSearch        | Geometrical      | 2,943          |
| AC2001    | 8145     | 807788     | 412204  | activityBasedSearch | Geometrical      | 56,475         |
| AC3       | 8145     | 807788     | 412204  | activityBasedSearch | Geometrical      | 62,269         |
| AC3rm     | 8145     | 807788     | 412204  | activityBasedSearch | Geometrical      | 59,110         |
| AC3bit+rm | 8150     | 4624804    | 2320839 | activityBasedSearch | Geometrical      | 358,920        |
| FC        | 8263     | 22062      | 19305   | activityBasedSearch | Geometrical      | 6,379          |
| AC2001    | 2260     | 32826      | 21410   | Default             | Luby             | 4,473          |
| AC3       | 2260     | 32826      | 21410   | Default             | Luby             | 4,836          |
| AC3rm     | 2260     | 32826      | 21410   | Default             | Luby             | 4,668          |
| AC3bit+rm | 1538     | 21433      | 14239   | Default             | Luby             | 3,541          |
| FC        | 4012     | 422693     | 220857  | Default             | Luby             | 35,540         |
| AC2001    | 4013     | 58875      | 38853   | intVarSearch        | Luby             | 8,623          |
| AC3       | 4013     | 58875      | 38853   | intVarSearch        | Luby             | 9,042          |
| AC3rm     | 4013     | 58875      | 38853   | intVarSearch        | Luby             | 8,795          |
| AC3bit+rm | 1800     | 25163      | 16816   | intVarSearch        | Luby             | 4,012          |
| FC        | 2202     | 31662      | 20792   | intVarSearch        | Luby             | 4,641          |
| AC2001    | 14190    | 4462229    | 2252260 | activityBasedSearch | Luby             | 386,228        |
| AC3       | 14190    | 4462229    | 2252260 | activityBasedSearch | Luby             | 408,953        |
| AC3rm     | 14190    | 4462229    | 2252260 | activityBasedSearch | Luby             | 402,331        |
| AC3bit+rm | 12955    | 126274     | 81290   | activityBasedSearch | Luby             | 19,440         |
| FC        | 14255    | 8158389    | 4100540 | activityBasedSearch | Luby             | 611,864        |

Πρόβλημα Depots01 – Λύση σε 5 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|-------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 624        | 335   | Default             | NULL             | 0,355          |
| AC3       | 0        | 624        | 335   | Default             | NULL             | 0,317          |
| AC3rm     | 0        | 624        | 335   | Default             | NULL             | 0,297          |
| AC3bit+rm | 0        | 624        | 335   | Default             | NULL             | 0,294          |
| FC        | 0        | 649        | 336   | Default             | NULL             | 0,284          |
| AC2001    | 0        | 646        | 332   | intVarSearch        | NULL             | 0,280          |
| AC3       | 0        | 646        | 332   | intVarSearch        | NULL             | 0,283          |
| AC3rm     | 0        | 646        | 332   | intVarSearch        | NULL             | 0,351          |
| AC3bit+rm | 0        | 646        | 332   | intVarSearch        | NULL             | 0,267          |
| FC        | 0        | 559        | 293   | intVarSearch        | NULL             | 0,304          |
| AC2001    | 7066     | 1295       | 7724  | activityBasedSearch | NULL             | 1,767          |
| AC3       | 7066     | 1295       | 7724  | activityBasedSearch | NULL             | 1,812          |
| AC3rm     | 7066     | 1295       | 7724  | activityBasedSearch | NULL             | 1,751          |
| AC3bit+rm | 7066     | 1871       | 8012  | activityBasedSearch | NULL             | 1,747          |
| FC        | 7082     | 638        | 7408  | activityBasedSearch | NULL             | 1,670          |
| AC2001    | 15       | 167        | 117   | Default             | Geometrical      | 0,236          |
| AC3       | 15       | 167        | 117   | Default             | Geometrical      | 0,251          |
| AC3rm     | 15       | 167        | 117   | Default             | Geometrical      | 0,274          |
| AC3bit+rm | 15       | 168        | 119   | Default             | Geometrical      | 0,265          |
| FC        | 15       | 153        | 115   | Default             | Geometrical      | 0,222          |
| AC2001    | 15       | 159        | 118   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,243          |
| AC3       | 15       | 159        | 118   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,259          |
| AC3rm     | 15       | 159        | 118   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,239          |
| AC3bit+rm | 15       | 162        | 120   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,243          |
| FC        | 16       | 214        | 157   | intVarSearch        | Geometrical      | 0,231          |
| AC2001    | 7108     | 1323       | 7759  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,793          |
| AC3       | 7108     | 1323       | 7759  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,839          |
| AC3rm     | 7108     | 1323       | 7759  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,791          |
| AC3bit+rm | 7108     | 984        | 7578  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,704          |
| FC        | 7124     | 971        | 7582  | activityBasedSearch | Geometrical      | 1,708          |
| AC2001    | 43       | 216        | 197   | Default             | Luby             | 0,255          |
| AC3       | 43       | 216        | 197   | Default             | Luby             | 0,265          |
| AC3rm     | 43       | 216        | 197   | Default             | Luby             | 0,265          |
| AC3bit+rm | 43       | 216        | 197   | Default             | Luby             | 0,252          |
| FC        | 83       | 423        | 391   | Default             | Luby             | 0,286          |
| AC2001    | 52       | 271        | 246   | intVarSearch        | Luby             | 0,280          |
| AC3       | 52       | 271        | 246   | intVarSearch        | Luby             | 0,264          |
| AC3rm     | 52       | 271        | 246   | intVarSearch        | Luby             | 0,323          |
| AC3bit+rm | 52       | 271        | 246   | intVarSearch        | Luby             | 0,260          |
| FC        | 52       | 230        | 227   | intVarSearch        | Luby             | 0,248          |
| AC2001    | 8194     | 1095       | 7842  | activityBasedSearch | Luby             | 1,822          |
| AC3       | 8194     | 1095       | 7842  | activityBasedSearch | Luby             | 1,899          |
| AC3rm     | 8194     | 1095       | 7842  | activityBasedSearch | Luby             | 1,803          |
| AC3bit+rm | 8194     | 1095       | 7842  | activityBasedSearch | Luby             | 1,783          |
| FC        | 8166     | 490        | 7439  | activityBasedSearch | Luby             | 1,699          |



Πρόβλημα Depots02 – Λύση σε 8 βήματα

| Algorithm | Restarts | BackTracks | Fails   | SearchStrategy      | Restart Strategy | Time (seconds) |
|-----------|----------|------------|---------|---------------------|------------------|----------------|
| AC2001    | 0        | 39010      | 19543   | Default             | NULL             | 5,832          |
| AC3       | 0        | 39010      | 19543   | Default             | NULL             | 6,035          |
| AC3rm     | 0        | 39010      | 19543   | Default             | NULL             | 6,044          |
| AC3bit+rm | 0        | 34372      | 17230   | Default             | NULL             | 4,974          |
| FC        | 0        | 35380      | 17711   | Default             | NULL             | 4,919          |
| AC2001    | 0        | 35140      | 17603   | intVarSearch        | NULL             | 5,411          |
| AC3       | 0        | 35140      | 17603   | intVarSearch        | NULL             | 5,654          |
| AC3rm     | 0        | 35140      | 17603   | intVarSearch        | NULL             | 5,735          |
| AC3bit+rm | 0        | 40288      | 20168   | intVarSearch        | NULL             | 5,923          |
| FC        | 0        | 63543      | 31835   | intVarSearch        | NULL             | 8,598          |
| AC2001    | 26410    | 1498410    | 775660  | activityBasedSearch | NULL             | 197,798        |
| AC3       | 26410    | 1498410    | 775660  | activityBasedSearch | NULL             | 218,790        |
| AC3rm     | 26410    | 1498410    | 775660  | activityBasedSearch | NULL             | 212,901        |
| AC3bit+rm | 26410    | 1736540    | 894741  | activityBasedSearch | NULL             | 225,925        |
| FC        | 26437    | 942502     | 497739  | activityBasedSearch | NULL             | 123,977        |
| AC2001    | 49       | 38915      | 19836   | Default             | Geometrical      | 6,229          |
| AC3       | 49       | 38915      | 19836   | Default             | Geometrical      | 6,555          |
| AC3rm     | 49       | 38915      | 19836   | Default             | Geometrical      | 6,396          |
| AC3bit+rm | 47       | 32408      | 16579   | Default             | Geometrical      | 5,106          |
| FC        | 44       | 60500      | 30589   | Default             | Geometrical      | 8,222          |
| AC2001    | 47       | 34982      | 17915   | intVarSearch        | Geometrical      | 5,337          |
| AC3       | 47       | 34982      | 17915   | intVarSearch        | Geometrical      | 5,570          |
| AC3rm     | 47       | 34982      | 17915   | intVarSearch        | Geometrical      | 5,569          |
| AC3bit+rm | 47       | 34148      | 17523   | intVarSearch        | Geometrical      | 5,082          |
| FC        | 44       | 33598      | 17137   | intVarSearch        | Geometrical      | 5,116          |
| AC2001    | 26493    | 2197633    | 1125805 | activityBasedSearch | Geometrical      | 277,826        |
| AC3       | 26493    | 2197633    | 1125805 | activityBasedSearch | Geometrical      | 316,168        |
| AC3rm     | 26493    | 2197633    | 1125805 | activityBasedSearch | Geometrical      | 320,785        |
| AC3bit+rm | 26493    | 1209461    | 631609  | activityBasedSearch | Geometrical      | 178,345        |
| FC        | 26519    | 762148     | 407933  | activityBasedSearch | Geometrical      | 108,625        |
| AC2001    | 2841     | 48851      | 31402   | Default             | Luby             | 14,803         |
| AC3       | 2841     | 48851      | 31402   | Default             | Luby             | 15,527         |
| AC3rm     | 2841     | 48851      | 31402   | Default             | Luby             | 15,539         |
| AC3bit+rm | 2585     | 43863      | 28261   | Default             | Luby             | 12,311         |
| FC        | 3226     | 62565      | 39892   | Default             | Luby             | 14,659         |
| AC2001    | 3158     | 52357      | 33892   | intVarSearch        | Luby             | 16,256         |
| AC3       | 3158     | 52357      | 33892   | intVarSearch        | Luby             | 17,500         |
| AC3rm     | 3158     | 52357      | 33892   | intVarSearch        | Luby             | 16,969         |
| AC3bit+rm | 2646     | 45638      | 30078   | intVarSearch        | Luby             | 13,618         |
| FC        | 2690     | 52506      | 33215   | intVarSearch        | Luby             | 13,005         |
| AC2001    | 34000    | 891806     | 485026  | activityBasedSearch | Luby             | 137,175        |
| AC3       | 34000    | 891806     | 485026  | activityBasedSearch | Luby             | 156,242        |
| AC3rm     | 34000    | 891806     | 485026  | activityBasedSearch | Luby             | 155,725        |
| AC3bit+rm | 34000    | 779806     | 429352  | activityBasedSearch | Luby             | 125,342        |
| FC        | 34612    | 1825694    | 953783  | activityBasedSearch | Luby             | 228,812        |