ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

του

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Κ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ

Υποβλήθηκε ως απαιτούμενο για την απόκτηση του μεταπτυχιακού διπλώματος
ειδίκευσης στη Διοίκηση Επιχειρήσεων

Φεβρουάριος 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον καθηγητή μου, καθηγητή του τμήματος Διοίκησης Επιχειρήσεων του Πανεπιστημίου Μακεδονίας, κ. Ανδρέα Γεωργίου, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ολοκληρώσω τη διατριβή μου, και μάλιστα με ένα τόσο επίκαιρο θέμα.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κώστα και Μαρία, για την υποστήριξη τους, τη Δέσποινα για την κατανόησή της, και ιδιαίτερα τη Φρύνη για όσα πρόσφερε σε εμένα και την οικογένειά μου όλα αυτά τα χρόνια.

Θεσσαλονίκη, Φεβρουάριος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία πραγματεύεται βασικές αρχές τις Θεωρίας Παιγνίων και των εφαρμογών της στη σύγχρονη πραγματικότητα. Χωρίζεται σε δύο κύριες θεματικές ενότητες. Στην πρώτη ενότητα, που περιλαμβάνει τα κεφάλαια 1 και 2, εισάγονται οι βασικές έννοιες της Θεωρίας Παιγνίων, ενώ στη δεύτερη ενότητα, που αποτελείται από το κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται η χρησιμότητα που έχει στην επίλυση ενός μεγάλου και επίκαιρου οικολογικού προβλήματος.

Στο κεφάλαιο 1 αναφέρονται βασικές αρχές της Επιχειρησιακής Έρευνας, κλάδο της οποίας αποτελεί και η Θεωρία Παιγνίων. Στο κεφάλαιο 2 αναλύονται κλασσικά παίγνια μηδενικού αλλά και μη-μηδενικού αθροίσματος, όπως το φημισμένο "Prisoner's Dilemma", και περιγράφεται ένα μεγάλο φάσμα των εφαρμογών τους. Παρατίθενται οι ορισμοί της βελτιστοποίησης κατά Paretto και της ισορροπίας Nash, που αποτελούν τη βάση για την επίλυση παιγνίων με καταστάσεις ανταγωνιστικής αλληλεξάρτησης μεταξύ δύο ή περισσότερων παικτών.

Στο κεφάλαιο 3 αναζητείται η λύση στο μεγαλύτερο οικολογικό πρόβλημα του 21^{ου} αιώνα, το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παρουσιάζονται επιλεγμένα μοντέλα προσομοίωσης από τη διεθνή βιβλιογραφία, που κάνοντας χρήση βασικών κανόνων και θεωρημάτων της Θεωρίας Παιγνίων προσδιορίζουν τις απαιτούμενες μειώσεις εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Μέσα από την αξιολόγηση τους επιχειρείται η διαμόρφωση μιας πρότασης για την αντιμετώπιση του φαινομένου.

Λέξεις – κλειδιά : Θεωρία Παιγνίων, βελτιστοποίηση Paretto, ισορροπία Nash, φαινόμενο του θερμοκηπίου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ iv

Κεφάλαιο 1. Ποσοτική Ανάλυση και Αποφάσεις
1.1 Εισαγωγή 1
1.2 Η προσέγγιση της Ποσοτικής Ανάλυσης για τη Λήψη Αποφάσεων 2
1.3 Μοντέλα Ποσοτικής Ανάλυσης 5
1.4 Ντετερμινιστικά και Στοχαστικά μοντέλα 7
1.4.1 Ντετερμινιστικά Μοντέλα Διαχείρισης Αποθεμάτων 8
1.4.2 Στοχαστικά Μοντέλα Διαχείρισης Αποθεμάτων 9
1.5 Μοντέλα Δυναμικού Προγραμματισμού 9
1.5.1 Προσδιοριστικά μοντέλα Δυναμικού Προγραμματισμού 10
1.6 Μοντέλα Γραμμικού και μη-Γραμμικού Προγραμματισμού 11
1.6.1 Γραμμικός Προγραμματισμός 12
1.6.1.1 Προέλευση Γραμμικού Προγραμματισμού 12
1.6.1.2 Αρχές και μοντέλα Γραμμικού Προγραμματισμού 12
1.6.2 Ακέραιος Προγραμματισμός 13
1.6.2.1 Μέθοδοι επίλυσης Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού 14
1.6.2.2 Εφαρμογές του Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού 15
1.6.3 Μη Γραμμικός Προγραμματισμός 16
1.7 Μοντέλα πολλαπλών κριτηρίων 17
1.8 Μοντέλα πολλών ληπτών και Θεωρία Παιγνίων 18

Κεφάλαιο 2. Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων
2.1 Εισαγωγή 20
2.2 Ορισμοί παιγνίων 21
2.3 Παίγνια δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος 22
2.3.1 Αμιγής στρατηγική 22
2.3.1.1 Στρατηγικές maximin και minimax 23
2.3.1.2 Κυρίαρχη στρατηγική 24
2.3.2 Μικτή στρατηγική 24
2.3.3 Χαρακτηριστικά παραδείγματα και εφαρμογές παιγνίων δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος 28
2.4 Παίγνια δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος με n x 2 και 2 x n επιλογές 37

2.4.1 Μέθοδοι επίλυσης ενός παιγνίου n x 2 και 2 x n επιλογές 37
2.4.2 Χαρακτηριστικό παράδειγμα παιγνίου n x 2 37
2.5 Παίγνια δύο παικτών μη μηδενικού αθροίσματος 42
2.5.1 Εισαγωγή 42
2.5.2 Ορισμοί παιγνίων μη μηδενικού αθροίσματος 43
2.5.2.1 Βελτιστοποίηση κατά Paretto 45
2.5.2.2 Ισορροπία Nash 45
2.5.3 Χαρακτηριστικά παίγνια μη μηδενικού αθροίσματος 50
2.5.3.1 Το παίγνιο Prisoner's Dilemma 50
2.5.3.1.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου 50
2.5.3.1.2 Χαρακτηριστικές εφαρμογές του παιγνίου 52
2.5.3.2 Το παίγνιο Stag hunt 55
2.5.3.2.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου 55
2.5.3.2.2 Χαρακτηριστικές εφαρμογές του παιγνίου 58
2.5.3.3 Το παίγνιο Traveler's Dilemma 58
2.5.3.4 Το παίγνιο Chicken game 63
2.5.3.4.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου 64
2.5.3.5 Το παίγνιο Volunteer's Dilemma 67
2.5.3.6 Το παίγνιο Battle of the Sexes 68
2.5.3.7 Το παίγνιο Dollar auction 70
2.5.3.7.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου 70
2.5.3.8 Το παίγνιο Deadlock 72
2.5.3.8.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου 72
2.5.3.8.2 Το παίγνιο Coffman Deadlock 73

Κεφάλαιο 3. Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου
3.1 Εισαγωγή 72
3.1.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου ως φυσική διεργασία 72
3.1.2 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου ως οικολογικό πρόβλημα 76
3.2 Έρευνα για την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης του φαινομένου του θερμοκηπίου 80
3.2.1 "How global is the solution to global warming ?".....81
3.2.1.1 Εισαγωγή 81
3.2.1.2 Ανάλυση του μοντέλου και της μεθόδου προσομοίωσης 82
3.2.1.2.1 Πηγές και δεδομένα 82
3.2.1.2.2 Κατηγοριοποίηση των μοντέλων προσομοίωσης 83
3.2.1.2.3 Οριακό όφελος και συνάρτηση κόστους 85
3.2.1.3 Καθορισμός της βέλτιστης μείωσης των εκπομπών GHG 88

3.2.1.3.1 Το βέλτιστο κατά Paretto σενάριο 89
3.2.1.3.2 Το σενάριο Nash 90
3.2.1.3.3 Το σενάριο ισορροπίας Nash 92
3.2.1.4 Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου 94
3.2.1.5 Δημιουργία συμμαχιών 96
3.2.2 "Sticks and carrots for the design of international climate agreements with renegotiations" 99
3.2.2.1 Εισαγωγή 100
3.2.2.2 Βέλτιστος κανόνας διανομής σε τέλειες κατά Paretto συμμαχίες 102
3.2.2.3 Αριθμητικό μοντέλο και πηγές δεδομένων 107
3.2.2.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης 109
3.2.2.4.1 Βέλτιστη διανομή για μία δεσμευτική περίοδο 109
3.2.2.4.2 Βέλτιστη διανομή με παίγνια επαναδιαπραγμάτευσης 111
3.2.3 "How crucial is Cooperation in Mitigating world climate? Analysis with World Markal" 117
3.2.3.1 Εισαγωγή 117
3.2.3.2 Συνεργασία ή Διαφοροποίηση 118
3.2.3.3 Το ολοκληρωμένο μοντέλο Markal 119
3.2.3.3.1 Το προηγμένο μοντέλο Markal πολλαπλών περιφερειών 119
3.2.3.3.2 Υπολογισμός της ισορροπίας Nash με το μοντέλο Markal 122
3.2.3.3.3 Χαρακτηριστική συνάρτηση του σεναρίου διαφοροποίησης 124
3.2.3.3.4 Πιθανά σενάρια περιβαλλοντικών ζημιών 125
3.2.3.3.5 Προσομοίωση του μοντέλου 127
3.2.3.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης 127
3.2.3.4.1 Κλιματολογικά και οικονομικά αποτελέσματα 128
3.2.3.4.2 Ενεργειακά και τεχνολογικά αποτελέσματα 129
3.2.3.5 Διανομή του παγκόσμιου οφέλους 131
3.2.3.5.1 Αριθμός των παικτών και πιθανά σενάρια 132
3.2.3.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με τη διανομή του κέρδους και τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις περιφέρειες 133
3.2.3.6 Συμμαχίες χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση 136
3.2.4 "New roads to International Environmental Agreements : The case of global warming" 138
3.2.4.1 Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης 138
3.2.4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης 140
3.2.4.2.1 Αξιολόγηση των σταθερών δομών συμμαχιών 145
3.3 Αξιολόγηση των μοντέλων και αναζήτηση της βέλτιστης λύσης 148

3.3.1 Η εξέλιξη των περιβαλλοντικών συμφωνιών 148
3.3.2 Σχολιασμός των προτεινόμενων μοντέλων 151
3.3.3 Συμπεράσματα 159
3.4 Η άλλη άποψη : "Το φαινόμενο του Θερμοκηπίου. Μύθος ή πραγματικότητα ;".....161
Βιβλιογραφία xi

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Σπουδαιότερες εφαρμογές του γραμμικού προγραμματισμού 13
Πίνακας 2.1 Γενικός πίνακας πληρωμών παιγνίου μη μηδενικού αθροίσματος 22
Πίνακας 2.2 Πίνακας πληρωμών παιγνίου διαπραγμάτευσης συμβολαίου 25
Πίνακας 2.3 Κλειστός βρόχος του κριτηρίου minimax (maximin) 26
Πίνακας 2.4 Ελαττωμένος πίνακας πληρωμών 26
Πίνακας 2.5 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου «κεφαλή-γράμματα» 29
Πίνακας 2.6 Υπολογισμός προσδοκώμενου οφέλους για τον παίκτη Α του παραδείγματος 2.2 30
Πίνακας 2.7 Πίνακας πληρωμών του παραδείγματος 2.2 31
Πίνακας 2.8 Πίνακας πληρωμών μετά την αφαίρεση των υποδεέστερων στρατηγικών 31
Πίνακας 2.9 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου «πέτρα-ψαλίδι-χαρτί» 33
Πίνακας 2.10 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου Morra 34
Πίνακας 2.11 Πίνακας πληρωμών του παραδείγματος 2.6 38
Πίνακας 2.12 Μειωμένος πίνακας πληρωμών του παραδείγματος 2.6 39
Πίνακας 2.13 Γενικός πίνακας πληρωμών παιγνίου δύο παικτών μη μηδενικού αθροίσματος 43
Πίνακας 2.14 Γενικός πίνακας πληρωμών ενός ανταγωνιστικού παιγνίου 47
Πίνακας 2.15 Γενικός πίνακας πληρωμών ενός παιγνίου συνεργασίας 48
Πίνακας 2.16 Γενικός πίνακας πληρωμών με ισορροπία Nash 49
Πίνακας 2.17 Γενικός πίνακας πληρωμών του παιγνίου Prisoner's Dilemma 51
Πίνακας 2.18 Γενικός πίνακας πληρωμών του παιγνίου Stag hunt 56
Πίνακας 2.19 Πίνακας αριθμητικού παραδείγματος του παιγνίου Stag hunt 56
Πίνακας 2.20 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου Traveler's Dilemma 59
Πίνακας 2.21 Πίνακας αποτελεσμάτων του πειράματος Traveler's Dilemma 62
Πίνακας 2.22 Γενικός πίνακας πληρωμών του παιγνίου Chicken game 64
Πίνακας 2.23 Πίνακας πληρωμών τύπου Prisoner's Dilemma 64
Πίνακας 2.24 Πίνακας πληρωμών του παραδείγματος 2.10 66
Πίνακας 2.25 Γενικός πίνακας πληρωμών του παιγνίου Volunteer's Dilemma 68
Πίνακας 2.26 Πίνακας πληρωμών Α του παιγνίου Battle of the Sexes 69
Πίνακας 2.27 Πίνακας πληρωμών Β του παιγνίου Battle of the Sexes 69
Πίνακας 2.28 Γενικός πίνακας πληρωμών του παιγνίου Deadlock 72
Πίνακας 3.1 Μεταβολή των ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου 77
Πίνακας 3.2 Οι δώδεκα περιφέρειες προσομοίωσης του μοντέλου STACO 109

Πίνακας 3.3 Αναλυτικά αποτελέσματα προσομοίωσης για τη συμμαχία {USA,EET,IND,DAE} 111
Πίνακας 3.4 Βέλτιστες σταθερές συμμαχίες για παίγνια με επαναδιαπραγματεύσεις έπειτα από 50 έτη 112
Πίνακας 3.5 Αναλυτικά αποτελέσματα για τις βέλτιστες συμμαχίες της 1ης και 2ης δεσμευτικής περιόδου με επαναδιαπραγματεύσεις έπειτα από 50 έτη 113
Πίνακας 3.6 Αναλυτικά αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικές περιόδους επαναδιαπραγμάτευσης 114
Πίνακας 3.7 Αναλυτικά αποτελέσματα προσομοίωσης για δύο δεσμευτικές περιόδους και επαναδιαπραγμάτευσεις έπειτα από 30 έτη 116
Πίνακας 3.8 Οι 15 περιφέρειες προσομοίωσης του μοντέλου Markal 120
Πίνακας 3.9 Συσσωρευμένες ζημίες και η κατανομή τους ανά περιφέρεια 126
Πίνακας 3.10 Αποτελέσματα οικονομικών και κλιματικών αλλαγών 128
Πίνακας 3.11 Παγκόσμιες τελικές καταναλώσεις ενέργειας ανά κατηγορία 130
Πίνακας 3.12 Ανταλλαγές μεταξύ των περιφερειών 134
Πίνακας 3.13 Ανάλυση σταθερότητας της υπερ-συμμαχίας 136
Πίνακας 3.14 Σταθερές δομές συμμαχιών χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση 142
Πίνακας 3.15 Σταθερές δομές συμμαχιών με οικονομική αλληλεπίδραση 143

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος 3
Σχήμα 1.2 Εναλλακτική κατηγοριοποίηση της διαδικασίας λήψης απόφασης 3
Σχήμα 1.3 Ο ρόλος της ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης 4
Σχήμα 2.1 Γραφική επίλυση του παιγνίου nx2 του παραδείγματος 2.6 39
Σχήμα 3.1 Ο κύκλος του φαινομένου του θερμοκηπίου 75
Σχήμα 3.2 Παγκόσμιος χάρτης με τα κράτη που δεσμεύονται από το Πρωτόκολλο του Kyoto κατά το έτος 2010 160

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 3.1 Παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά κατηγορία για το έτος 2000 77
Γράφημα 3.2 Οι 5 χώρες-περιφέρειες με τις μεγαλύτερες εκπομπές για το έτος 2005 79
Γράφημα 3.3 Οικονομική ζημία διάφορων περιφερειών προσομοίωσης στο 2 x CO_2 σενάριο 83
Γράφημα 3.4 Οφέλη από την ποσοστιαία μείωση κατά 1, 2, 3% του ρυθμού αύξησης των εκπομπών 84
Γράφημα 3.5 Μειώσεις εκπομπών σύμφωνα με το βέλτιστο κατά Paretto σενάριο 90
Γράφημα 3.6 Μειώσεις εκπομπών στο σενάριο Nash 91
Γράφημα 3.7 Μειώσεις εκπομπών στο σενάριο ισορροπίας Nash 92
Γράφημα 3.8 Εθνική και διεθνής συνιστώσα των μειώσεων εκπομπών 93
Γράφημα 3.9 Μεταβολή των παραμέτρων r και q_i 94
Γράφημα 3.10 Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου στην οικονομική ζημία D_i 95
Γράφημα 3.11 Διεθνής και εθνική συνιστώσα των μειώσεων των εκπομπών 97
Γράφημα 3.12 Βέλτιστες κατά Paretto συμμαχίες για μία δεσμευτική περίοδο 110
Γράφημα 3.13.a Κατανομή του οφέλους των συμμαχιών υπό το σενάριο A1B-REF 133
Γράφημα 3.13.b Κατανομή του οφέλους των συμμαχιών υπό το σενάριο A1B-REV 134
Γράφημα 3.14 Το γράφημα “hockey stick” 164

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΦΑΣΕΙΣ

1.1 Εισαγωγή

Η Διοικητική Επιστήμη (Management Science) είναι η εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών και μεθόδων στη λήψη διοικητικών αποφάσεων. Κύριος στόχος της είναι να βοηθάει τους managers να λαμβάνουν τις βέλτιστες αποφάσεις, παρέχοντας τους μία αρκετά αποδοτική πρόταση επίλυσης των προβλημάτων τους.. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες μαθηματικές τεχνικές αλλά και συστηματικές διαδικασίες που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους επιστημονικούς κλάδους, όπως των μαθηματικών και των μηχανικών, και εφαρμόζονται σε προβλήματα Διοίκησης.

Εκ πρώτης όψεως φαίνεται περίεργη η σύζευξη των όρων Διοίκηση και Επιστήμη, καθότι για πολλούς η Διοίκηση θεωρείται ως ένα έμφυτο προσόν, ένα είδος τέχνης και όχι επιστήμης. Κατά τον 20ο αιώνα ωστόσο έγιναν έντονες προσπάθειες για την εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων σε διοικητικές διαδικασίες. Πρωτοπόροι σε αυτόν τον τομέα υπήρξαν πολύ γνωστοί επιστήμονες, όπως ο F.W. Taylor, οι Frank και Lillian Gilbreeth, καθώς και ο H.L. Gantt, ο εφευρέτης των ομώνυμων διαγραμμάτων που χρησιμοποιούνται ευρύτατα και σήμερα.

Η έξαρση ωστόσο της χρησιμοποίησης επιστημονικών μεθόδων πραγματοποιήθηκε κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Τότε οι Άγγλοι συγκρότησαν ομάδες από διάφορους επιστημονικούς κλάδους με καθήκον την πραγματοποίηση **έρευνας** σε στρατιωτικές **επιχειρήσεις**. Αυτή η κίνηση οδήγησε στην επιτυχημένη χρήση των ραντάρ, τα οποία αποτέλεσαν ένα σημαντικό όπλο για την τελική επικράτηση των Συμμαχικών Δυνάμεων. Ανάλογες προσπάθειες υιοθετήθηκαν και εφαρμόστηκαν επιτυχώς και σε επιχειρήσεις των Ενόπλων Δυνάμεων των Η.Π.Α.

Όπως είναι γνωστό μετά τη λήξη του πολέμου ακολούθησε μια εκτεταμένη Βιομηχανική Επανάσταση, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων προϊόντων και υπηρεσιών, την αύξηση της παραγωγής και της ζήτησης αλλά και των απαιτήσεων των καταναλωτών. Τα παραπάνω ωστόσο οδήγησαν στην αύξηση του αριθμού αλλά και της πολυπλοκότητας των διοικητικών προβλημάτων. Κάτω από αυτές τις συνθήκες λοιπόν πολλά διοικητικά στελέχη

αλλά και διοικητικοί αναλυτές άρχισαν να επεξεργάζονται νέες μεθόδους και τεχνικές που θα διευκόλυναν την επίλυση των προβλημάτων.

Έτσι, καθιέρωσαν μία νέα διαδικασία επίλυσης προβλημάτων, συμβατή με τις αρχές της επιχειρησιακής έρευνας (operational research) που βασίζεται στην επίλυση των προβλημάτων τους μέσω της μαθηματικής τους απεικόνισης με αντίστοιχα μοντέλα. Με τη χρήση διάφορων ποσοτικών τεχνικών δοκιμάστηκαν πολλαπλά μοντέλα, που η επίλυση τους διευκόλυνε τα στελέχη στη λήψη αποφάσεων. Αυτή η γενικότερη αντίληψη, της χρήσης επιστημονικών τεχνικών για την επίλυση διοικητικών προβλημάτων είναι το κύριο χαρακτηριστικό της **Διοικητικής Επιστήμης ή Επιχειρησιακής Έρευνας**.

Η εφαρμογή ωστόσο αυτών των τεχνικών περιοριζόταν από το μεγάλο φόρτο των πράξεων που απαιτούνταν για την επίλυση τους και ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθούν μόνο από ανθρώπινο χέρι. Η ανάπτυξη και εκτεταμένη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατά τη δεκαετία του 1960 υπερκέρασε κι αυτό το εμπόδιο και επέτρεψε την επίλυση πολύπλοκων και σύνθετων προβλημάτων.

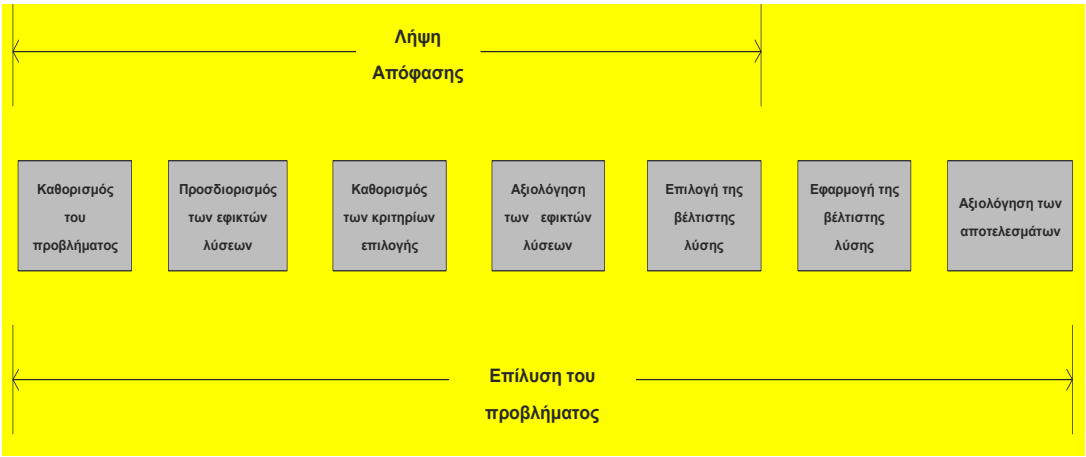
Σήμερα η Επιχειρησιακή Έρευνα θεωρείται ως ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στη Διοίκηση Επιχειρήσεων. Οι εφαρμογές της είναι πολλές και σε διαφορετικούς τομείς και χρησιμοποιείται για την επίλυση κυβερνητικών, στρατιωτικών, βιομηχανικών και ακαδημαϊκών προβλημάτων.

Στις επόμενες λοιπόν ενότητες θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των κυριότερων ποσοτικών τεχνικών και μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην Επιχειρησιακή Έρευνα. Σκοπός αυτής της κίνησης δεν είναι απλά η στείρα παράθεση και καταγραφή των εφαρμοζόμενων διαδικασιών και μαθηματικών τεχνικών, αλλά η εξοικείωση του αναγνώστη με τη λογική και την επιστημονική προσέγγιση που χρησιμοποιείται από τη Διοικητική Επιστήμη.

1.2 Η προσέγγιση της Ποσοτικής Ανάλυσης για τη Λήψη Αποφάσεων

Πολλές φόρες, ακόμη και στην καθημερινότητα , άτομα βρίσκονται απέναντι σε προβλήματα, άλλοτε εύκολα κι άλλοτε δυσκολότερα, τα οποία πρέπει να επιλύσουν. Ξοδεύουν μάλιστα πολύ χρόνο και ενέργεια αγωνιώντας για το τι πρέπει να κάνουν. Αρχικά μελετούν όλες τις πτυχές και παραμέτρους του προβλήματος και στη συνέχεια επεξεργάζονται και προσδιορίζουν ένα σύνολο εφικτών λύσεων.

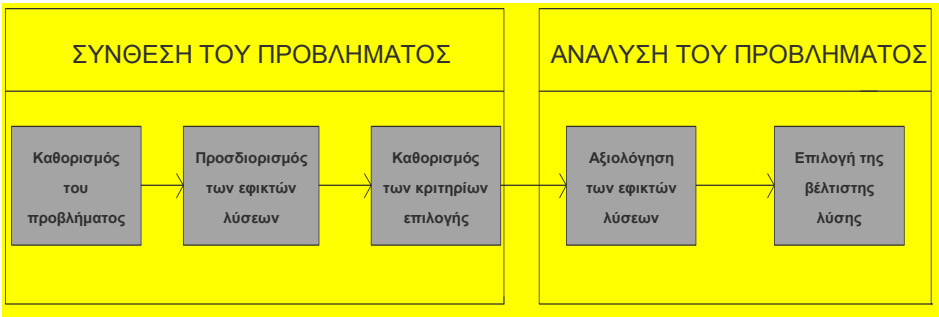
Τις παραπάνω κινήσεις, που κάθε λογικό άτομο θα έκανε για να λάβει μία απόφαση η Διοικητική Επιστήμη τις συστηματοποιεί και τις προσδιορίζει ως ένα σύνολο επτά βημάτων που οδηγούν στην επίλυση ενός προβλήματος. Μία σχηματική παρουσίαση της διαδικασίας δίνεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος

Όπως γίνεται αντιληπτό η επίλυση του προβλήματος περιλαμβάνει και τα επτά βήματα που αναφέρονται ενώ το πρόβλημα απόφασης ή βελτιστοποίησης ολοκληρώνεται στο πέμπτο βήμα με την επιλογή της βέλτιστης λύσης.

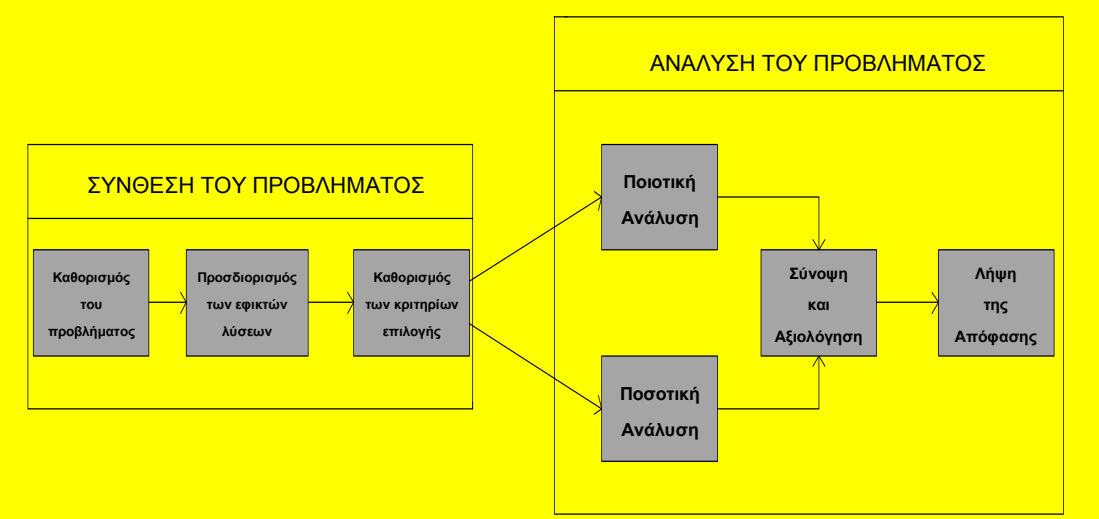
Μάλιστα η διαδικασία λήψης της απόφασης θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο στάδια : - τη σύνθεση του προβλήματος (βήματα 1,2,3), και, - την ανάλυση του προβλήματος (βήματα 4,5), (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 Εναλλακτική κατηγοριοποίηση της διαδικασίας λήψης απόφασης.

Η φάση της ανάλυσης του προβλήματος, μπορεί να λάβει δύο βασικές μορφές (Σχήμα 1.3) : - την ποιοτική ανάλυση, και, - την ποσοτική ανάλυση. Η ποιοτική ανάλυση βασίζεται

κυρίως στην εμπειρία και την ικανότητα του διοικητικού στελέχους και χρησιμοποιείται κυρίως όταν πρόκειται να επιλυθούν σχετικά απλά προβλήματα.



Σχήμα 1.3 Ο ρόλος της ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης

Όταν ωστόσο χρησιμοποιείται ποσοτική ανάλυση, ο αναλυτής πρέπει να επικεντρωθεί στα ποσοτικά στοιχεία και δεδομένα που σχετίζονται με το πρόβλημα και να αναπτύξει μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν τους στόχους, τους περιορισμούς και όποιες άλλες συνδέσεις υπάρχουν στο πρόβλημα. Στη συνέχεια με χρήση κάποιας ποσοτικής μεθόδου, θα επιλύσει το πρόβλημα και θα καταλήξει στην απόφασή του.

Το βέβαιο είναι ότι για τη λήψη μιας απόφασης απαιτείται τόσο η ποιοτική όσο και η ποσοτική ανάλυση. Ενώ όμως οι ικανότητες για την ποιοτική προσέγγιση είναι έμφυτες, ή μη, στον κάθε αναλυτή και αυξάνουν με την εμπειρία, η πραγματοποίηση ποσοτικής ανάλυσης απαιτεί εξαιρετική γνώση των τεχνικών και μεθόδων της επιχειρησιακής έρευνας. Ένα διοικητικό στέλεχος μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητά του στη λήψη αποφάσεων εμπλουτίζοντας τις γνώσεις του στις ποσοτικές μεθοδολογίες και κατανοώντας τη σπουδαιότητα της ποσοτικής ανάλυσης στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Αυτό θα του επιτρέψει την καλύτερη αξιολόγηση και αξιοποίηση και των διαθέσιμων ποιοτικών στοιχείων.

Καθώς συνήθως ένα πρόβλημα επιλογών έχει ένα σκοπό που πρέπει να πραγματοποιηθεί και ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών με τις οποίες θα τον επιτύχει, ένα πρόβλημα απόφασης ή ένα **πρόβλημα βελτιστοποίησης** διαθέτει μία **αντικειμενική συνάρτηση** (ο στόχος που πρέπει να επιτευχθεί) και ένα **εφικτό σύνολο** ή **σύνολο επιλογών**

(οι εναλλακτικές επιλογές). Το ζητούμενο είναι ποια επιλογή θα επιτύχει καλύτερα τον καθορισμένο σκοπό ή στόχο.

1.3 Μοντέλα Ποσοτικής Ανάλυσης

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, πολύ σημαντικό στάδιο αποτελεί η μετατροπή μιας γενικής περιγραφής του προβλήματος σε ένα καλώς ορισμένο πρόβλημα που θα μπορεί να προσεγγιστεί με τις τεχνικές της ποσοτικής ανάλυσης. Το επόμενο βήμα είναι η ανάπτυξη ενός **μοντέλου** που θα περιγράφει το πρόβλημα με μαθηματικό τρόπο και φυσικά η επίλυση του. Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι πάρα πολλά και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Μία πρώτη πολύ γενική διάκριση τους είναι σε εικονικά, αναλογικά και μαθηματικά μοντέλα.

Τα **εικονικά μοντέλα (iconic models)** αποτελούν φυσική απεικόνιση ενός πραγματικού αντικειμένου. Για παράδειγμα μία μινιατούρα ενός αεροπλάνου αποτελεί μία απεικόνιση του πραγματικού αεροπλάνου. Επίσης υπάρχουν μοντέλα τα οποία έχουν την ίδια φυσική έννοια όχι όμως και απεικόνιση με το «αντικείμενο» που περιγράφουν. Ένα παράδειγμα είναι ο χιλιομετροδείκτης του αυτοκίνητου. Η θέση του δείκτη απεικονίζει την ταχύτητα του οχήματος. Ομοίως και το θερμόμετρο καταγράφει τη θερμοκρασία ενός σώματος. Τέτοια μοντέλα ονομάζονται **αναλογικά (analog models).**

Τέλος μία τρίτη κατηγορία μοντέλων, με την οποία θα ασχοληθούμε εκτενώς, περιλαμβάνει την απεικόνιση του προβλήματος μέσω ενός συστήματος συμβόλων και μαθηματικών σχέσεων ή εκφράσεων. Τέτοια μοντέλα καλούνται **μαθηματικά μοντέλα (mathematical models)** και αποτελούν το κύριο δομικό στοιχείο της Ποσοτικής Ανάλυσης.

Όπως είναι γνωστό, κάθε πρόβλημα έχει ένα σκοπό που πρέπει να πραγματοποιηθεί. Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει το σκοπό του προβλήματος καλείται **αντικειμενική συνάρτηση (objective function)** του μοντέλου. Παράλληλα, υπάρχουν και διάφορα εμπόδια στην προσπάθεια να επιτύχουμε το σκοπό μας, που παριστάνονται με μαθηματικές σχέσεις και καλούνται **περιορισμοί (constraints)**. Επιπλέον υπάρχουν μεταβλητές που επηρεάζουν το κριτήριο επιλογής της βέλτιστης λύσης, δηλαδή το στόχο του προβλήματος. Αυτές μπορεί να καθορίζονται από το λήπτη της απόφασης, δηλαδή να είναι **ελεγχόμενες (controllable variables)**, οπότε καλούνται **μεταβλητές απόφασης (decision variables)**, ή να καθορίζονται από εξωγενείς παράγοντες, οπότε ονομάζονται **μη ελεγχόμενες μεταβλητές (uncontrollable variables)**.

Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω εννοιών, θα αναφέρουμε ένα σύντομο παράδειγμα βελτιστοποίησης. Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι μία εταιρία θέλει να μεγιστοποιήσει τα κέρδη της από την πώληση ενός προϊόντος. Αν με P συμβολίσουμε το συνολικό κέρδος, ενώ το κέρδος ανά μονάδα είναι 10 €, τότε τα συνολικά κέρδη από την πώληση x προϊόντων θα δίνονται από τη σχέση :

$$P = 10x \tag{1.1}$$

Καθώς στόχος του προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους, προφανώς η παραπάνω σχέση αποτελεί την **αντικειμενική συνάρτηση** του προβλήματος. Για την παραγωγή κάθε μονάδας απαιτούνται 5 εργατοώρες ενώ οι διαθέσιμες ώρες παραγωγής ανά εβδομάδα είναι 40. Αν με x συμβολίσουμε τον αριθμό των παραγόμενων μονάδων ανά εβδομάδα, τότε οδηγούμαστε στη σχέση :

$$5x \leq 40 \tag{1.2}$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί έναν **περιορισμό** του προβλήματος. Υπάρχει κι ένας δεύτερος περιορισμός της μη αρνητικότητας των παραγόμενων μονάδων. Το πρόβλημα απόφασης λοιπόν είναι το εξής : Πόσες μονάδες του προϊόντος πρέπει να παράγονται ανά εβδομάδα ώστε να μεγιστοποιείται το κέρδος ; Ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο για αυτό το απλό πρόβλημα παραγωγής είναι :

" *Μεγιστοποίησε την* $P = 10x$ *, αντικειμενική συνάρτηση,*
λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς $5x \leq 40$ *και* $x \geq 0$ "

Στο συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο το κέρδος ανά μονάδα και ο χρόνος παραγωγής ανά μονάδα, είναι εξωγενείς παράγοντες που δεν καθορίζονται από το λήπτη της απόφασης, είναι δηλαδή οι **μη ελεγχόμενες μεταβλητές** του προβλήματος. Αντίστοιχα η μόνη **ελεγχόμενη μεταβλητή** του προβλήματος, που μπορεί δηλαδή να καθοριστεί, είναι ο αριθμός **x** των παραγόμενων μονάδων, που αποτελεί και τη μοναδική **μεταβλητή απόφασης**.

Μετά την ανάλυση και κατανόηση των κύριων στοιχείων και εννοιών ενός μοντέλου, μπορούμε στις επόμενες ενότητες να προχωρήσουμε σε μία πιο λεπτομερή ανάλυση των σημαντικότερων τύπων μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί, παραθέτοντας παράλληλα και ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ένα μοντέλο μπορεί να καταταγεί σε περισσότερες από μία κατηγορίες που θα περιγραφούν στη συνέχεια.

1.4 Ντετερμινιστικά και Στοχαστικά Μοντέλα

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, οι μη ελεγχόμενες μεταβλητές είναι εκείνες που δεν καθορίζονται από το λήπτη της απόφασης. Άλλοτε μπορεί να είναι εκ των προτέρων γνωστές και άλλοτε άγνωστες και να υπόκεινται σε διασπορά. Όταν **όλες** οι μη ελεγχόμενες μεταβλητές ενός μοντέλου είναι γνωστές και δεν αποκλίνουν, τότε το μοντέλο χαρακτηρίζεται ως **ντετερμινιστικό (deterministic model)**.

Για παράδειγμα οι φόροι εισοδήματος δεν καθορίζονται από τα διοικητικά στελέχη και γι' αυτό το λόγο αποτελούν μη ελεγχόμενες μεταβλητές για πολλά μοντέλα λήψης απόφασης. Επειδή αυτοί οι φόροι είναι γνωστοί και παγιωμένοι –τουλάχιστον για σύντομα χρονικά διαστήματα- ένα μαθηματικό μοντέλο με μοναδική μη ελεγχόμενη μεταβλητή τους φόρους εισοδήματος, θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ντετερμινιστικό.

Αντίθετα, αν **έστω και μία** μη ελεγχόμενη μεταβλητή υπόκειται σε διασπορά, το μοντέλο χαρακτηρίζεται ως **στοχαστικό ή πιθανοτικό (stochastic or probabilistic).** Μία μη ελεγχόμενη μεταβλητή σε πολλά προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής είναι η ζήτηση του προϊόντος. Κάθε μαθηματικό μοντέλο που χειρίζεται τη ζήτηση με αβεβαιότητα είναι στοχαστικό.

Στο πρόβλημα παραγωγής που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα οι ώρες για την παραγωγή μίας μονάδας προϊόντος, οι συνολικές διαθέσιμες ώρες και το κέρδος ανά μονάδα ήταν όλες μη ελεγχόμενες μεταβλητές. Επειδή όλες τους είχαν λάβει προκαθορισμένες τιμές, το μοντέλο θεωρήθηκε ντετερμινιστικό.

Αν ωστόσο ο χρόνος παραγωγής μίας μονάδας ποίκιλε από 3 έως 6 ώρες ανάλογα με την ποιότητα της πρώτης ύλης, τότε το μοντέλο θα ήταν στοχαστικό. Το κύριο χαρακτηριστικό ενός στοχαστικού μοντέλου είναι ότι η τιμή της εξόδου δε μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως ακόμη και όταν η ελεγχόμενη μεταβλητή λάβει συγκεκριμένη τιμή, αφού οι μη ελεγχόμενες μεταβλητές παραμένουν άγνωστες. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση των στοχαστικών μοντέλων είναι αρκετά δύσκολη.

Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό, διάφορα μοντέλα θα μπορούσαν να διακριθούν και να χαρακτηριστούν άλλα ως στοχαστικά κι άλλα ως ντετερμινιστικά. Στην παρούσα ενότητα ωστόσο θα γίνει αναφορά στους πιο χαρακτηριστικούς τύπους μοντέλων των δύο αυτών κατηγοριών, που αφορούν κυρίως τη διαχείριση αποθεμάτων.

Το βασικό πρόβλημα της διαχείρισης αποθεμάτων είναι ο προσδιορισμός της ποσότητας των παραγγελιών καθώς και ο χρονικός προγραμματισμός τους. Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τα παραπάνω είναι και εδώ η ζήτηση του προϊόντος. Επιπλέον τα μοντέλα αυτά διακρίνονται σε συνεχούς και περιοδικής επιθεώρησης ανάλογα με το αν είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση του ύψους του αποθέματος ή όχι.

1.4.1 Ντετερμινιστικά Μοντέλα Διαχείρισης Αποθεμάτων

Το σημαντικότερο μοντέλο της θεωρίας αποθεμάτων είναι το Μοντέλο Οικονομικής Ποσότητας (Economic Order Quantity EOQ Model) και οι διάφορες παραλλαγές του. Στη συνέχεια παρατίθενται και περιγράφονται σύντομα τα κυριότερα ντετερμινιστικά μοντέλα διαχείρισης αποθεμάτων, που είναι τα εξής :

- ***Το βασικό μοντέλο Οικονομικής Ποσότητας Παραγγελίας.***
  Ο ρυθμός ζήτησης του προϊόντος θεωρείται γνωστός και σταθερός, έστω α (μονάδες προϊόντος ανά χρονική μονάδα). Αυτό σημαίνει ότι το προϊόν καταναλίσκεται από την αποθήκη που περιέχει το απόθεμα με ρυθμό α και για το λόγο αυτό μιλάμε για προσδιοριστική ομοιόμορφη ζήτηση. Επιπλέον, η πολιτική που ακολουθείται για την αναπλήρωση του αποθέματος είναι να παραγγέλνεται ποσότητα Q μονάδων κάθε φορά που το απόθεμα μηδενίζεται. Κάθε παραγγελία θεωρείται άμεσα παραδοτέα (Χρόνος παραγγελίας - παραλαβής = 0).

- ***Το μοντέλο Συνεχούς Επιθεώρησης με Ομοιόμορφη Προσδιοριστική Ζήτηση και με Ελλείμματα Αποθέματος.***
  Ισχύουν οι ίδιες υποθέσεις με το βασικό μοντέλο οικονομικής ποσότητας παραγγελίας αλλά επιτρέπονται ελλείμματα αποθεμάτων τα οποία αναπληρώνονται από την επόμενη παραγγελία (backlogging).

- ***Το μοντέλο Συνεχούς Επιθεώρησης με Ομοιόμορφη Προσδιοριστική Ζήτηση και εκπτώσεις πάνω από μια ποσότητα παραγγελίας.***
  Οι υποθέσεις είναι οι ίδιες με αυτές του βασικού μοντέλου οικονομικής παραγγελίας χωρίς ελλείμματα, με μόνη διαφορά ότι το κόστος αγοράς ανά μονάδα προϊόντος είναι μεγαλύτερο για παραγγελίες μεγέθους μικρότερου μιας συγκεκριμένης ποσότητας, και μικρότερο για παραγγελίες μεγέθους μεγαλύτερου της ποσότητας αυτής.

- ***Το μοντέλο Συνεχούς Επιθεώρησης με Ομοιόμορφη Προσδιοριστική Ζήτηση και με σταδιακή ομοιόμορφη αναπλήρωση αποθέματος χωρίς επιτρεπόμενες ελλείψεις.***

  Γενικά ισχύουν οι υποθέσεις του βασικού προτύπου χωρίς ελλείμματα αλλά θεωρείται ότι το απόθεμα αναπληρώνεται ομοιόμορφα με ρυθμό τ (μονάδες προϊόντος ανά χρονική μονάδα), αρχίζοντας με την τοποθέτηση της παραγγελίας, και όχι ακαριαία όπως στα προηγούμενα μοντέλα.

1.4.2 Στοχαστικά Μοντέλα Διαχείρισης Αποθεμάτων

Στα αντίστοιχα στοχαστικά μοντέλα η ζήτηση είναι γνωστή μόνο πιθανοθεωρητικά, και εφαρμόζονται κυρίως με χρήση των υπολογιστών. Το βασικό μοντέλο είναι το εξής, το οποίο έχει κάποιες παραλλαγές ανάλογα με τη μορφή της ζήτησης :

- ***Το γενικό Πιθανοθεωρητικό Πρότυπο Οικονομικής Ποσότητας Παραγγελίας (probabilistic EOQ model) ή Πρότυπο Σημείου Αναπαραγγελίας (reorder point ROP model).***

  Το μοντέλο αυτό είναι ανάλογο του μοντέλου της οικονομικής ποσότητας παραγγελίας μόνο που η ζήτηση για το προϊόν είναι στοχαστική και υπάρχει σταθερός χρόνος παράδοσης ή παραλαβής χρονικής διάρκειας λ. Όταν το επίπεδο αποθέματος μειώνεται στο επίπεδο ασφαλείας s, τότε δίνεται παραγγελία με σκοπό να ανέβει το απόθεμα σε επίπεδο S (παραγγελία ποσότητας Q = S-s). Η πολιτική αυτή ονομάζεται (s , S) και η ανικανοποίητη ζήτηση ικανοποιείται άμεσα όταν γίνει αναπλήρωση του αποθέματος. Ανάλογα με τη μορφή της κατανομής που ακολουθεί η ζήτηση (εκθετική, κανονική, κ.α.), καθορίζεται και το σημείο αναπαραγγελίας.

1.5 Μοντέλα Δυναμικού Προγραμματισμού

Μία ακόμη κατηγοριοποίηση των μοντέλων είναι σε **στατικά** και **δυναμικά μοντέλα ή μοντέλα δυναμικού προγραμματισμού**. Όταν λοιπόν ο χειρισμός όλων των μεταβλητών ενός προβλήματος γίνεται ταυτόχρονα και συνεπώς η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται σε ένα στάδιο, τότε το χρησιμοποιούμενο μοντέλο καλείται στατικό.

Αντίθετα , σε ένα μοντέλο δυναμικού προγραμματισμού το αρχικό σύνθετο πρόβλημα, που περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό μεταβλητών απόφασης, διαιρείται σε μια ακολουθία

υποπροβλημάτων, καθένα από τα οποία έχει μικρότερο αριθμό μεταβλητών απόφασης και για το λόγο αυτό είναι ευκολότερο να επιλυθεί. Για την επίλυση τέτοιων **πολυσταδιακών προβλημάτων** απαιτείται η λήψη μιας ακολουθίας αλληλοσυνδεόμενων αποφάσεων.

Επιπλέον, μία ακόμη πολύ σημαντική αρχή του Δυναμικού προγραμματισμού είναι η επίλυση του προβλήματος δουλεύοντας από το τέλος προς την αρχή του προβλήματος. Σε αυτή βασίζονται μια σειρά από ευρύτατες εφαρμογές του δυναμικού προγραμματισμού, όπως είναι και το Πρόβλημα της Συντομότερης Διαδρομής.

1.5.1. Προσδιοριστικά Μοντέλα Δυναμικού Προγραμματισμού

Τα προσδιοριστικά μοντέλα δυναμικού προγραμματισμού χρησιμοποιούνται σε προβλήματα, στα οποία η κατάσταση του επόμενου σταδίου προσδιορίζεται πλήρως από την κατάσταση και την απόφαση του τρέχοντος σταδίου. Στα προβλήματα αυτά δεν υπάρχει ούτε αβεβαιότητα ούτε και κατανομή πιθανότητας για το ποια είναι η επόμενη κατάσταση της διαδικασίας. Αντίθετα στα στοχαστικά μοντέλα δυναμικού προγραμματισμού η κατάσταση του επόμενου σταδίου δεν προσδιορίζεται πλήρως από την κατάσταση και την απόφαση του τρέχοντος σταδίου, αλλά υπάρχει μια κατανομή πιθανότητας για ην επόμενη κατάσταση.

Τα πιο γνωστά δυναμικά μοντέλα, που βρίσκουν και εφαρμογές σε πολύ γνωστά προβλήματα είναι προσδιοριστικά και θα γίνει μια σύντομη αναφορά τους στη συνέχεια. Αντίθετα, οι εφαρμογές των στοχαστικών μοντέλων είναι πιο εξειδικευμένες και δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν στην εργασία αυτή.

Ειδικότερα, τα σπουδαιότερα προβλήματα που επιλύονται με προσδιοριστικά μοντέλα δυναμικού προγραμματισμού είναι τα εξής :

- **Προβλήματα κατανομής Πόρων (Allocation Problem)**
  Αφορούν την κατανομή ενός πόρου, π.χ. χρήματα, μηχανές, ανθρώπινο δυναμικό κ.α., σε έναν αριθμό διαφορετικών δραστηριοτήτων. Η κατανομή μέρους ή ολόκληρης της διαθέσιμης ποσότητας του πόρου σε μια δραστηριότητα συνεπάγεται μιαν απόδοση , το ύψος της οποίας εξαρτάται από τη συγκεκριμένη δραστηριότητα, καθώς και από την ποσότητα του πόρου που κατανέμεται στη δραστηριότητα. Αντικειμενικός σκοπός είναι η κατανομή της διαθέσιμης ποσότητας του πόρου στις διάφορες δραστηριότητες, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική απόδοση.

- **Προβλήματα δικτύου (Network Problems)**

  Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται το πολύ γνωστό πρόβλημα της "Συντομότερης Διαδρομής". Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται στην εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ μιας προέλευσης και ενός προορισμού ενός συγκεκριμένου συνεκτικού δικτύου, όταν οι αποστάσεις των ακμών του δικτύου είναι γνωστές. Αποτελεί το χαρακτηριστικότερο, ίσως, παράδειγμα δυναμικού προγραμματισμού και οι εφαρμογές του είναι ευρύτατες κυρίως σε προβλήματα διαχείρισης και διανομής (κλάδος Logistics).

- **Προβλήματα Μεγιστοποίησης Αξίας (Knapsack Problem)**

  Ο τύπος αυτών των προβλημάτων γενικά αναφέρεται ως "Το πρόβλημα του Γυλιού". Το πρόβλημα αφορά τον προσδιορισμό της ποσότητας από κάθε τύπο διαφορετικών αντικειμένων που πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα σάκο, ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική αξία του σάκου, χωρίς ωστόσο να γίνει υπέρβαση της χωρητικότητάς του. Η χωρητικότητα συνήθως περιγράφεται με όρους συνολικού βάρους, και κάθε τύπος αντικειμένου έχει συγκεκριμένο βάρος και συγκεκριμένη αξία. Οι εφαρμογές του συγκεκριμένου προβλήματος είναι ευρύτατες, κυρίως στον τομέα της βιομηχανίας.

- **Προβλήματα Προγραμματισμού Παραγωγής (Scheduling Problem)**

  Αυτά τα προβλήματα αφορούν τον προγραμματισμό της παραγωγής μιας βιομηχανίας λαμβάνοντας υπόψη την προβλεπόμενη ζήτηση, το κόστος αποθήκευσης των αποθεμάτων και άλλους καίριους παράγοντες.

Αυτές είναι οι σημαντικότερες εφαρμογές του δυναμικού προγραμματισμού στο χώρο της επιχειρησιακής έρευνας. Παράλληλα υπάρχουν και άλλες σπουδαίες εφαρμογές σε διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η ακολουθία Fibonacci, ο αλγόριθμος του Early, και πολλοί άλλοι αλγόριθμοι με εύρος εφαρμογών από τη βιομηχανία έως την ιατρική (www.wikipedia.org).

1.6 Μοντέλα Γραμμικού και μη Γραμμικού Προγραμματισμού

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά σε μία από τις παλαιότερες και σημαντικότερες εφαρμογές της Επιχειρησιακής Έρευνας, το Γραμμικό Προγραμματισμό (Linear Programming), και τις εφαρμογές του. Επιπλέον θα περιγραφούν και άλλες δύο τεχνικές

μοντελοποίησης, ο Ακέραιος Προγραμματισμός (Integer Programming) και ο Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Non Linear Programming).

1.6.1 Γραμμικός προγραμματισμός

1.6.1.1 Προέλευση Γραμμικού Προγραμματισμού

Παρότι η προέλευση των μαθηματικών τεχνικών προγραμματισμού ανάγεται στις θεωρίες των γραμμικών και μη γραμμικών εξισώσεων, ως θεμελιωτής του Γραμμικού Προγραμματισμού θεωρείται ο George B. Dantzig. Την εργασία του την ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου όταν η Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α. του είχε αναθέσει την έρευνα για την ανάπτυξη μαθηματικών τεχνικών και την επίλυση των προβλημάτων διαχείρισης και διανομής υλικών (Logistics).

Η πρώτη του δημοσίευση που αφορούσε την εύρεση μιας μεθόδου επίλυσης , της μεθόδου Simplex, πραγματοποιήθηκε το 1947 και η μέθοδος τελειοποιήθηκε λίγο αργότερα με τη συνεισφορά των επιστημόνων Marshall Wood και Alex Orden.

Οι αρχικές εφαρμογές του Γραμμικού Προγραμματισμού αφορούσαν προβλήματα Logistics, μεταφοράς και προμηθειών. Αργότερα επεκτάθηκαν και σε ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων τόσο ιδιωτικών όσο και δημόσιων φορέων, και ξεκίνησε να χρησιμοποιείται και ως εργαλείο στη Διοίκηση Επιχειρήσεων. Ο αριθμός των εφαρμογών του πολλαπλασιάστηκε τα τελευταία χρόνια με την ευρύτατη χρησιμοποίηση των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

1.6.1.2 Αρχές και μοντέλα Γραμμικού Προγραμματισμού

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός ασχολείται κυρίως με το πρόβλημα της άριστης κατανομής των περιορισμένων πόρων μεταξύ ανταγωνιζόμενων δραστηριοτήτων. Οι πόροι μπορεί να είναι η εργασία, οι πρώτες ύλες, ο υλικοτεχνικός εξοπλισμός, τα διαθέσιμα κεφάλαια. Η αποστολή του manager είναι να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα με τους περιορισμένους αυτούς πόρους.

Αφού λοιπόν αναγνωριστεί το πρόβλημα, προσδιοριστούν οι στόχοι της διοίκησης και ελεγχθεί η εφαρμοσιμότητα του γραμμικού προγραμματισμού, το επόμενο βήμα είναι η ανάπτυξη ενός κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τρία στάδια :

1. Τον προσδιορισμό των μεταβλητών απόφασης.

1. Την ανάπτυξη μιας αντικειμενικής συνάρτησης που αποτελεί γραμμική σχέση των μεταβλητών απόφασης και έχει τη μορφή:

$$f(x_1, x_2, ..., x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_nx_n \quad (1.3)$$

όπου $x_1, x_2, ..., x_n$ είναι οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος και $c_1, c_2, ..., c_n$ σταθερές.

3. Τον καθορισμών των περιορισμών του προβλήματος, που επίσης πρέπει να αποτελούν γραμμικές σχέσεις των μεταβλητών απόφασης, δηλαδή να είναι της μορφής :

$$c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_nx_n \geq b \text{ ,και, } c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_nx_n \leq b \quad (1.4)$$

όπου b ένας πραγματικός αριθμός.

Με την παραπάνω διαδικασία έχουν δημιουργηθεί διάφορα μοντέλα με ευρύτατες εφαρμογές στο χώρο της Επιχειρησιακής Έρευνας. Οι πιο σπουδαίες από αυτές παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 1.1 Σπουδαιότερες εφαρμογές του Γραμμικού Προγραμματισμού

Εφαρμογές Γραμμικού Προγραμματισμού		
1.	Πρόβλημα μείγματος προϊόντων	Product Mix Problem
2.	Πρόβλημα δίαιτας	Diet Problem
3.	Πρόβλημα Μείξης	Blending Problem
4.	Επιλογή Χαρτοφυλακίου	Portfolio Selection
5.	Προγραμματισμός ανθρώπινου δυναμικού	Workforce Scheduling
6.	Χρηματοοικονομικές αποφάσεις	Financial Decisions
7.	Πολυσταδιακά προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής	Multistage Production Planning Problems
8.	Πρόβλημα μεταφοράς	Transportation Problem

Εκτός από τις παραπάνω εφαρμογές, που είναι και οι πιο διαδεδομένες, ο γραμμικός προγραμματισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλους κλάδους, όπως στη διαχείριση έργων, στην ανάπτυξη δικτύων μεταφοράς, κ.α. (Wayne L Winston, S.Christian Albright (1997)).

1.6.2 Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός

Μία ακόμη κατηγορία προβλημάτων της επιχειρησιακής έρευνας είναι εκείνα που μοντελοποιούνται με το γραμμικό προγραμματισμό, έχουν όμως την πρόσθετη απαίτηση μία ή περισσότερες μεταβλητές απόφασης να λαμβάνουν ακέραιες τιμές.

Σε πολλά καθημερινά προβλήματα οι μεταβλητές απόφασης μπορούν να λαμβάνουν και δεκαδικές τιμές. Για παράδειγμα μία μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για 1,59 ώρες και μπορούν να παραχθούν 1,27 τόνοι σιδήρου. Ωστόσο σε ένα πρόβλημα προσδιορισμού του αριθμού των χειριστών ενός μηχανήματος, σαφώς και δε μπορεί η λύση να είναι 2,25 χειριστές για κάθε 0,75 μηχανές. Τέτοιου τύπου προβλήματα απαιτούν ακέραιες τιμές των μεταβλητών απόφασης.

Όταν όλες οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος λαμβάνουν ακέραιες τιμές τότε πρόκειται για πρόβλημα **αμιγώς ακέραιου προγραμματισμού** (pure integer programming problem). Αν ορισμένες, όχι όμως όλες, οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν ακέραιες τιμές το πρόβλημα καλείται **μικτού γραμμικού προγραμματισμού** (mixed integer programming). Τέλος, σε πολλές εφαρμογές του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού μία ή περισσότερες μεταβλητές μπορούν να λαμβάνουν τις τιμές 0 ή 1 και καλούνται δυαδικές μεταβλητές (binary variables). Αν όλες οι μεταβλητές απόφασης είναι δυαδικές τότε το πρόβλημα είναι **δυαδικού γραμμικού προγραμματισμού** (binary integer programming).

Η χρήση του δυαδικού προγραμματισμού αύξησε θεαματικά το εύρος των εφαρμογών του γραμμικού προγραμματισμού. Ωστόσο το κύριο εμπόδιο ήταν και εξακολουθεί να παραμένει η δυσκολία στην επίλυση των προβλημάτων αυτού του τύπου.

1.6.2.1 Μέθοδοι επίλυσης Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού

Όπως προαναφέρθηκε, το σημαντικότερο πρόβλημα του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού είναι η δυσκολία επίλυσης του. Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος αυτού του προβλήματος αρκεί να αναφερθεί το εξής. Ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με εκατοντάδες χιλιάδες **συνεχείς** μεταβλητές μπορεί να επιλυθεί εύκολα με χρήση αρκετών λογισμικών του εμπορίου. Αντίθετα ένα πρόβλημα αμιγώς ακέραιου προγραμματισμού με λιγότερες από 100 μεταβλητές είναι πολύ δύσκολο να επιλυθεί.

Σήμερα, και έπειτα από πολλές προσπάθειες μπορούν να επιλυθούν τέτοια προβλήματα ,με σχετικά περιορισμένο ωστόσο αριθμό μεταβλητών, με τη χρήση διάφορων πακέτων λογισμικού του εμπορίου όπως τα OSL, CPLEX, και LINDO.

Οι πιο σημαντικοί αλγόριθμοι επίλυσης, πάνω στους οποίους βασίζονται και τα παραπάνω λογισμικά είναι οι εξής. (L.J. Moore, et. al. (1992)) :

- “cutting-plane”
- “branch and bound”
- “branch and cut”
- “branch and price”

1.6.2.2 Εφαρμογές του Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού

Το εύρος των εφαρμογών του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού είναι πολύ μεγάλο και αυτό οφείλεται κυρίως στη χρησιμοποίηση των δυαδικών μεταβλητών. Σε πολλά παραδείγματα οι δυαδικές μεταβλητές αντιστοιχούν σε κάποια δραστηριότητα που πρέπει να πραγματοποιηθεί. Όταν η μεταβλητή απόφασης λαμβάνει την τιμή 1, η δραστηριότητα πραγματοποιείται, ενώ για τιμή 0 δεν πραγματοποιείται.

Με τον τρόπο αυτό διαμορφώνονται διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την επίλυση γνωστών προβλημάτων. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές του δυαδικού προγραμματισμού περιγράφονται παρακάτω :

- **Πρόβλημα Επένδυσης Κεφαλαίων (Capital budgeting problem)**
  Πρόβλημα αμιγώς δυαδικού προγραμματισμού που προσδιορίζει σε ποιες δραστηριότητες πρέπει να γίνει επένδυση (τιμή μεταβλητής = 1) και σε ποιες όχι (τιμή μεταβλητής = 0) ώστε να υπάρξει μεγιστοποίηση του κέρδους.

- **Πρόβλημα Πάγιου Κόστους(Fixed cost problem)**
  Σε προβλήματα παραγωγής, το κόστος παραγωγής υπολογίζεται ως το άθροισμα δύο παραγόντων. Το πάγιο κόστος ,που είναι σταθερό, και το μεταβλητό κόστος που σχετίζεται απευθείας με την παραγόμενη ποσότητα. Με τη χρήση των δυαδικών μεταβλητών δημιουργείται ένα μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού που επιτρέπει την ενσωμάτωση του πάγιου κόστους στο πρόβλημα παραγωγής. Οι δυαδικές μεταβλητές καθορίζουν τη λειτουργία ,ή μη, της γραμμής παραγωγής.
- **Πρόβλημα Κατασκευής Δικτύου Διανομής (Distribution system design problem)**
  Στην περίπτωση αυτή σχεδιάζεται ένα ολοκληρωμένο δίκτυο διανομής. Είναι ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού. Τα κέντρα διανομής είναι προκαθορισμένα και πρέπει να επιλεγεί η τοποθεσία κατασκευής των νέων εργοστασίων που θα εξυπηρετεί καλύτερα το δίκτυο διανομής. Οι δυαδικές μεταβλητές καθορίζουν την κατασκευή ή μη του εργοστασίου στη συγκεκριμένη

τοποθεσία και οι συνεχείς μεταβλητές την ποσότητα του εμπορεύματος που θα διακινείται από τα εργοστάσια προς τα κέντρα διανομής.

- **Πρόβλημα Βέλτιστης Τοποθεσίας (Location Problem)**
  Στην περίπτωση αυτή πρέπει να προσδιοριστεί η βέλτιστη τοποθεσία που θα εξυπηρετεί καλύτερα κάποιον προκαθορισμένο στόχο. Για παράδειγμα ένας τραπεζικός όμιλος θέλει να κατασκευάσει καινούριο υποκατάστημα στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας και έχει να επιλέξει μεταξύ διάφορων πόλεων. Πιθανότατα η επιλογή θα είναι διαφορετική αν η επιδίωξη είναι ο μεγαλύτερος όγκος συναλλαγών και διαφορετική αν σκοπός είναι η καλύτερη εξυπηρέτηση κάποιας συγκεκριμένης μερίδας του καταναλωτικού κοινού(π.χ. αγροτών). Πρόκειται για ένα πρόβλημα αμιγώς ακέραιου προγραμματισμού όπου οι δυαδικές μεταβλητές αναπαριστούν την επιλογή, ή μη, μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας.

Όπως λοιπόν εύκολα γίνεται αντιληπτό, με τη χρήση του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού, και ειδικότερα του δυαδικού προγραμματισμού, είναι δυνατή η μοντελοποίηση και η επίλυση αρκετά σύνθετων διοικητικών προβλημάτων. Εκτός από τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν, υπάρχουν και άλλες περισσότερο πολύπλοκες εφαρμογές που συνδυάζουν και την επιστήμη του Marketing. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα μιας εταιρίας fast-food, της “Salem Foods” που επανασχεδίασε τα προϊόντα της και βελτιστοποίησε τη θέση της στην αγορά, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. (D.R.Anderson et al (2005))

1.6.3 Μη Γραμμικός Προγραμματισμός

Σε αρκετά προβλήματα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης της Επιχειρησιακής Έρευνας η αντικειμενική συνάρτηση είναι πιθανό να μην είναι γραμμική και το ίδιο μπορεί να ισχύει και για κάποιους από τους περιορισμούς. Ένα τέτοιο πρόβλημα βελτιστοποίησης καλείται μη γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού.

Μη γραμμικά μοντέλα προγραμματισμού ήταν και τα μοντέλα διαχείρισης αποθεμάτων, που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Η επίλυση τέτοιων προβλημάτων συνήθως είναι δύσκολη, ανάλογα βέβαια και με τον όγκο και την πολυπλοκότητα της περίπτωσης.

Ο σχεδιασμός αλγορίθμων επιλύσεως μη γραμμικών προβλημάτων βασίζεται κυρίως σε ανώτερα μαθηματικά και σε κανόνες διαφορικού λογισμού. Κάποια προβλήματα μικρού

φόρτου πράξεων μπορεί να επιλυθούν, και χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, εφαρμόζοντας τις συνθήκες των Karush-Kuhn-Tucker, τα κριτήρια πρώτης και δεύτερης τάξης για ακρότατα και το θεώρημα του Lagrange (Χ.Δ. Αλιπράντης, S.K. Chakrabarti, (2004)). Δε θα υπάρξει ωστόσο περισσότερη ανάλυση πάνω στο αντικείμενο αυτό καθώς αποκλίνει από τα πλαίσια της εργασίας.

1.7 Μοντέλα πολλαπλών κριτηρίων

Σε όλες τις προηγούμενες ενότητες χρησιμοποιήθηκαν ποσοτικές μέθοδοι που επέτρεπαν στους manager να προσδιορίσουν τη βέλτιστη λύση με βάση ένα συγκεκριμένο κριτήριο (π.χ. μεγιστοποίηση κέρδους, ελαχιστοποίηση κόστους και χρόνου). Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο λήπτης της απόφασης πρέπει να αξιολογήσει πολλαπλά κριτήρια προκειμένου να λάβει τη βέλτιστη απόφαση.

Για παράδειγμα ας υποτεθεί πως μια εταιρία αναζητά την κατάλληλη τοποθεσία για την κατασκευή του καινούριου της εργοστασίου. Ένα κριτήριο επιλογής αποτελεί το κόστος αγοράς έκτασης και κατασκευής, που διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Αν αυτό ήταν και το μοναδικό κριτήριο, θα επιλεγόταν η τοποθεσία που ελαχιστοποιεί το κόστος κατασκευής.

Είναι ωστόσο λογικό η διοίκηση της εταιρίας να θέσει και άλλα κριτήρια όπως η προσβασιμότητα του εργοστασίου στα κέντρα διανομής, η δυνατότητα εύρεσης στην περιοχή ικανού υπαλληλικού προσωπικού, ή και η φορολόγηση. Σε αυτήν την περίπτωση η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνει γιατί μπορεί μια τοποθεσία να υπερτερεί με βάση ένα κριτήριο και να υστερεί με κάποια άλλα.

Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τις **συνεχείς μεθόδους** (continuous methods) και τις **διακριτές** (discrete methods). Στις πρώτες υπάρχει τόσο αντικειμενική συνάρτηση όσο και περιορισμοί και χρησιμοποιούνται βασικές αρχές του γραμμικού προγραμματισμού. Αντίθετα οι δεύτερες βασίζονται περισσότερο στην υποκειμενικότητα του λήπτη αποφάσεως, και κάνουν χρήση συντελεστών βαρύτητας, τους οποίους βέβαια καθορίζει ο manager.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα συνεχούς μεθόδου αποτελεί ο **προγραμματισμός στόχων** (goal programming). Το μοντέλο περιέχει μία ή περισσότερες εξισώσεις "στόχου" και μία αντικειμενική συνάρτηση σχεδιασμένη να ελαχιστοποιεί τις αποκλίσεις από τους στόχους. Σε περιπτώσεις όπου η διαθεσιμότητα των πόρων ή άλλες δυσκολίες επηρεάζουν την επίτευξη

των στόχων, διαμορφώνονται περιορισμοί όπως ακριβώς και στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού.

Σε μοντέλα προγραμματισμού στόχων με επίπεδα προτεραιότητας, η αντικειμενική συνάρτηση σχεδιάζεται έτσι ώστε να επιτευχθεί λύση που θα ικανοποιεί το στόχο $1^{ου}$ επιπέδου. Στη συνέχεια αυτή η λύση δοκιμάζεται σε μία δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση σχεδιασμένη για την επίτευξη του $2^{ου}$ κατά προτεραιότητα στόχου και χωρίς να αλλοιώνεται ο $1^{ος}$ στόχος. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν εξεταστούν όλα τα επίπεδα προτεραιότητας.

Αντίστοιχα από τις πιο γνωστές διακριτές μεθόδους είναι τα **μοντέλα αξιολόγησης** (scoring models), που αποτελούν ένα γρήγορο και εύκολο τρόπο για την εύρεση της βέλτιστης εναλλακτικής λύσης σε ένα πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων. Ο λήπτης της απόφασης αντιστοιχεί έναν συντελεστή βαρύτητας σε κάθε κριτήριο επιλογής και στη συνέχεια εξετάζει πόσο ικανοποιούν οι εναλλακτικές επιλογές το κάθε κριτήριο (π.χ. σε μία κλίμακα 0-10). Η τελική βαθμολογία, που προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους βαθμολογιών ανά κριτήριο, καταδεικνύει την κατάταξη κάθε εναλλακτικής επιλογής λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια.

Μία ακόμη πολύ διαδεδομένη διακριτή μέθοδος είναι η **αναλυτική ιεραρχική διαδικασία** (analytic hierarchy process- AHP), που είναι σχεδιασμένη για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων (D.R.Anderson et al (2005)). Η μέθοδος αυτή απαιτεί από το λήπτη απόφασης να προσδιορίσει πρώτα τη σχετική βαρύτητα του κάθε κριτηρίου, και στη συνέχεια να αξιολογήσει την κάθε εναλλακτική επιλογή με βάση το κάθε κριτήριο, λαμβάνοντας έτσι υπόψη και τη σπουδαιότητα του κάθε κριτηρίου. Το αποτέλεσμα είναι μια κατάταξη προτεραιότητας των εναλλακτικών επιλογών βασισμένη στις επιλογές του λήπτη της απόφασης.

1.8 Μοντέλα πολλών ληπτών και Θεωρία Παιγνίων

Σε όλα τα προηγούμενα μοντέλα που εξετάστηκαν έπρεπε να προσδιοριστεί η βέλτιστη επιλογή από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών. Ο λήπτης των αποφάσεων μπορούσε να επηρεάσει μονοσήμαντα τα αποτέλεσμα επιλέγοντας τη σωστή εναλλακτική επιλογή. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις η ευημερία ενός ατόμου ή μιας επιχείρησης δεν εξαρτάται μόνο από τις δικές του κινήσεις αλλά, σε μεγάλο βαθμό, και από τις επιλογές των άλλων.

Για παράδειγμα πόσο εύκολο είναι για μια γαλακτοβιομηχανία να αποφασίσει μόνη της την αύξηση στην τιμή πώλησης του γάλακτος; Ποια θα είναι τότε η αντίδραση των άλλων εταιριών; Αν οι άλλες εταιρίες δεν ακολουθήσουν, η αύξηση των τιμών θα μπορέσει να πραγματοποιηθεί; Γιατί οι εταιρίες είναι τόσο επιφυλακτικές σε μία μονομερή αλλαγή των τιμών;

Απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα και σε μία σειρά πολλών άλλων, έρχεται να δώσει η θεωρία παιγνίων. Στην ουσία ξεκαθαρίζει το θόλο τοπίο που υπάρχει όταν πρέπει να ληφθούν αποφάσεις σε περιπτώσεις πολλών ληπτών και με ανταγωνιζόμενα συμφέροντα. Αξιοποιώντας και τη θεωρία πιθανοτήτων παρέχει ενημέρωση για τη σχετική πιθανότητα εμφανίσεως διάφορων γεγονότων, που θα επιτρέψουν στο manager να επιλέξει τη βέλτιστη ακολουθία κινήσεων.

Η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο της επιχειρησιακής έρευνας που τα τελευταία χρόνια εξαπλώνεται ταχύτατα. Οι εφαρμογές της είναι σημαντικές και ποικίλες, από το χώρο της βιομηχανίας και της οικονομίας, μέχρι τη χάραξη της εξωτερικής πολιτικής μιας χώρας. Όλα αυτά όμως θα εξεταστούν αναλυτικότερα και θα αποτελέσουν βασικό αντικείμενο τόσο του 2^{ου} όσο και του 3^{ου} κεφαλαίου της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Εξετάζοντας κάποιος το περιβάλλον μέσα στο οποίο καλείται να λάβει αποφάσεις , διαπιστώνει ότι αυτό μπορεί να προσδιοριστεί από τέσσερις βασικές μεταβλητές : τη σταθερότητα (certainty) , το ρίσκο (risk), την αβεβαιότητα (uncertainty) και τον ανταγωνισμό (conflict). Τη λήψη αποφάσεων υπό συνθήκες ρίσκου και αβεβαιότητας πραγματεύεται η Θεωρία Αποφάσεων (Decision Theory). Με την τέταρτη παράμετρο, τον ανταγωνισμό, ασχολείται πλήρως η **Θεωρία Παιγνίων (Game Theory)**.

Η Θεωρία Παιγνίων είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών που χρησιμοποιείται στις κοινωνικές και πολιτικές επιστήμες, στη βιολογία και την ιατρική, ακόμη και στη φιλοσοφία και την ψυχολογία . Αρχικά αναπτύχθηκε ως ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων σε καταστάσεις ανταγωνισμού ή σύγκρουσης και έτυχε παγκόσμιας αναγνώρισης στις αρχές της δεκαετίας του 1940 από τις εφαρμογές στον κλάδο των οικονομικών που πραγματοποίησαν ο μαθηματικός John von Neumann και ο οικονομολόγος Oskar Morgenstern στο σύγγραμμά τους με τίτλο “Theory of Games and Economic Behavior”. Έκτοτε ξεκίνησε η ευρύτατη εξάπλωσή της σε πολλούς κλάδους με αξιόλογες εφαρμογές κι αυτό πιστοποιείται από την απονομή επτά βραβείων Nobel σε μελετητές, μεταξύ των οποίων και ο περίφημος John Nash.

Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν θα παρουσιαστούν βασικές μέθοδοι και τεχνικές καθώς και χαρακτηριστικά προβλήματα που επιλύονται με τη βοήθεια της θεωρίας παιγνίων. Μία κατηγοριοποίηση των παιγνίων γίνεται με βάση των αριθμό των παικτών. Ο συνηθέστερος διαχωρισμός είναι μεταξύ παιγνίων δύο, ή τριών και περισσοτέρων παικτών. Εμάς θα μας απασχολήσουν κυρίως τα πρώτα, που έχουν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών και παρουσιάζουν και περισσότερο ενδιαφέρον. Θα υπάρξει ωστόσο η παρουσίαση μιας γραφικής μεθόδου που επιτρέπει την επίλυση 2 x n και n x 2 (n >2) προβλημάτων.

Μία ακόμη διάκριση γίνεται με βάση το συνολικό κέρδος από το παίγνιο, όπου τα παίγνια μηδενικού και σταθερού αθροίσματος (zero-sum and constant-sum games) διαχωρίζονται από τα παίγνια μη μηδενικού και μη σταθερού αθροίσματος (nonzero-sum and nonconstant-sum games). Στα πλαίσια του κεφαλαίου θα μελετηθούν και οι δύο κατηγορίες

των παραπάνω παιγνίων. Θα αναφερθούν ορισμένα από τα κλασσικά παίγνια, όπως το Prisoner's Dilemma και Chicken Game, καθώς επίσης και εφαρμογές τους στο χώρο της οικονομίας, των στρατιωτικών επιχειρήσεων, κ.α.

Τέλος, θα παρουσιαστούν τόσο η αμιγής όσο και η μικτή στρατηγική επίλυσης για τα παίγνια δύο παικτών, τα διάφορα σημεία ισορροπίας που έχουν οριστεί, και θα μελετηθεί ο παράγοντας της ανθρώπινης συμπεριφοράς και της ατομικής ιδιαιτερότητας που παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στη διαμόρφωση της στρατηγικής ενός παίκτη.

2..2. Ορισμοί παιγνίων

Η λέξη που πιθανότατα προκαλεί εντύπωση στο άκουσμα της φράσης "Θεωρία Παιγνίων" είναι το παίγνιο. Εύλογα θα αναρωτηθεί κάποιος πως μία ολόκληρη θεωρία με τεράστιες εφαρμογές που αποτελεί και κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών προσδιορίζεται από τη λέξη "παίγνιο". Τι ακριβώς λοιπόν αντικατοπτρίζει αυτή η λέξη στο χώρο των επιστημών;

Ως **παίγνιο (game)** μπορεί να θεωρηθεί η κατάσταση εκείνη, κατά την οποία δύο ή περισσότεροι ορθολογικοί παίκτες με αντικρουόμενους στόχους επιλέγουν τρόπους ενέργειας που δημιουργούν συνθήκες ανταγωνιστικής αλληλεξάρτησης. Στοιχεία του παιγνίου είναι οι παίκτες, οι κανόνες που διέπουν το παίγνιο, οι πληροφορίες που υπάρχουν κατά τη διάρκεια του παιγνίου και η αξιολόγηση των διάφορων αποτελεσμάτων.

Ο **παίκτης (player)** θεωρείται αυτόνομη μονάδα λήψης της απόφασης, παρότι δεν ελέγχει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του παιγνίου. Στη θεωρία παιγνίων ο παίκτης μπορεί να είναι ένα άτομο, μία επιχείρηση , ακόμη και ένα κράτος. Έχει σαφή αντικειμενικό σκοπό, τον οποίο προσπαθεί να πετύχει, αλλά και σαφή πλαίσια δράσης που καθορίζονται από τους κανόνες του παιγνίου αλλά και από το σύνολο των πόρων και των μέσων που διαθέτει.

Για να πετύχει το στόχο του ο παίκτης ακολουθεί μία στρατηγική. Με τον όρο στρατηγική περιγράφεται το σύνολο των επιλογών που κάνει ο παίκτης από την αρχή μέχρι το τέλος του παιγνίου. Η στρατηγική που θα υιοθετήσει μπορεί να είναι αμιγής ή και μεικτή.

Αμιγής στρατηγική (pure strategy) είναι εκείνη, στην οποία κάθε παίκτης επιλέγει μία μόνο από τις δυνατές επιλογές του στο ακέραιο, δηλαδή με πιθανότητα ίση με τη μονάδα, ενώ δεν επιλέγει καμιά από τις υπόλοιπες. Αντίθετα, η **μικτή στρατηγική (mixed strategy)** περιλαμβάνει συνδυασμό στρατηγικών, καθεμία από τις οποίες επιλέγεται με πιθανότητα μικρότερη της μονάδας.

Όπως προαναφέρθηκε, μία κατηγορία παιγνίων είναι τα **παίγνια σταθερού αθροίσματος δύο παικτών**. Δηλαδή για οποιοδήποτε συνδυασμό στρατηγικών των παικτών το άθροισμα των ανταμοιβών τους είναι μια σταθερά c, θετική ή αρνητική. Όταν η τιμή της σταθεράς είναι θετική, οι παίκτες μοιράζονται κάποια ανταμοιβή, ενώ όταν είναι αρνητική επιβαρύνονται με κάποιο κόστος.

Όταν η τιμή της σταθεράς είναι ίση με το μηδέν (c =0), τότε μιλάμε για **παίγνιο μηδενικού αθροίσματος δύο παικτών**. Σε αυτό, το κέρδος του ενός παίκτη είναι ίσο με τη ζημία του συμπαίκτη του. Αντίθετα, αν αυτό δεν συμβαίνει τότε πρόκειται για **παίγνιο μη μηδενικού αθροίσματος.**

Ένα παίγνιο δύο παικτών περιγράφεται συνήθως με ένα **πίνακα αποτελεσμάτων ή πληρωμών ή ανταμοιβών (payoff matrix)**, δηλαδή ένα πίνακα που δείχνει το αποτέλεσμα του παιγνίου για κάθε συνδυασμό στρατηγικών των παικτών.

2.3 Παίγνια δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται παίγνια δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος. Ο κάθε παίκτης μπορεί να ακολουθήσει αμιγή ή μικτή στρατηγική. Θα υπάρξει μελέτη και των δύο στρατηγικών ενώ στο τέλος της ενότητας θα παρουσιαστούν χαρακτηριστικά παραδείγματα.

2.3.1 Αμιγής στρατηγική

Απαραίτητο εργαλείο για την επίλυση παιγνίων δύο παικτών αποτελεί ο πίνακας αποτελεσμάτων. Ο κάθε παίκτης μπορεί να πληροφορηθεί για τις ακριβείς ανταμοιβές που προκύπτουν από κάθε δυνατό συνδυασμό στρατηγικών των δύο παικτών. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα για τον παίκτη Α που προκύπτουν από κάθε επιλογή των παικτών Α και Β. Οι τιμές του πίνακα αντιπροσωπεύουν το κέρδος(ή ζημία) του παίκτη Α κι επομένως τη ζημία (ή κέρδος) του παίκτη Β.

Πίνακας 2.1 Πίνακας πληρωμών παιγνίου μη-μηδενικού αθροίσματος

		Στρατηγικές του παίκτη Β		
		B_1	B_2	B_3
Στρατηγικές του παίκτη Α	A_1	80	40	75
	A_2	70	35	30

Κατά τη διάρκεια του παιγνίου, οι παίκτες γνωρίζουν τόσο τις δικές τους στρατηγικές, όσο και τις στρατηγικές του αντιπάλου τους. Παρατηρώντας τα στοιχεία του πίνακα πληρωμών εύκολα διαπιστώνει κανείς ότι αντικειμενικός σκοπός του παίκτη Α είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους του, ενώ του Β η ελαχιστοποίηση των απωλειών του.

Ο παίκτης Α προτιμά να επιλέξει τη στρατηγική A_1 αντί της A_2, καθώς ακόμη και στη χειρότερη περίπτωση το πιθανό ελάχιστο κέρδος του θα είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της στρατηγικής A_2. Αντίστοιχα, η βέλτιστη επιλογή του παίκτη Β είναι η στρατηγική B_2 διότι αυτή ελαχιστοποιεί τις απώλειές του.

Επομένως οι άριστες στρατηγικές των παικτών είναι για τον Α η A_1 και για τον Β η B_2. Οι δύο αυτές στρατηγικές συνθέτουν τη λύση, και καθορίζου την **τιμή του παιγνίου** (value of the game) που συμβολίζεται με το γράμμα V (για τον πίνακα 2.1 V = 40). **Όταν η τιμή του παιγνίου λαμβάνει τιμή ίση με το μηδέν (V = 0), τότε το παίγνιο καλείται δίκαιο**.

2.3.1.1 Στρατηγικές maximin και minimax

Οι δύο αυτές στρατηγικές ουσιαστικά περιγράφουν όσα εφαρμόστηκαν στο παραπάνω παράδειγμα. Αντικειμενικός σκοπός του παίκτη Α είναι η επίτευξη του μέγιστου κέρδους. Για το λόγο αυτό ο Α θα ακολουθεί τη στρατηγική maximin, δηλαδή θα επιλέγει πάντα το μέγιστο (**maxi**mum) των ελαχίστων (**min**imum) στοιχείων των σειρών του πίνακα πληρωμών.

Αντίστοιχα, αντικειμενικός σκοπός του Β είναι η ελάχιστη δυνατή ζημία. Έτσι ο Β θα ακολουθεί τη στρατηγική minimax, δηλαδή θα επιλέγει πάντα το ελάχιστο (**mini**mum) των μέγιστων (**max**imum) στοιχείων των στηλών.

Εάν σε ένα παίγνιο το στοιχείο του πίνακα πληρωμών της στρατηγικής maximin είναι το ίδιο με το στοιχείο της στρατηγικής minimax, το στοιχείο αυτό ονομάζεται **σημείο ισορροπίας ή σαγματικό σημείο (saddle point)** και δίνει την τιμή του παιγνίου. Ισχύει δηλαδή η σχέση :

$$\max_i \min_j a_{ij} = \min_j \max_i a_{ij}, i = 1, 2, .., n, \; j = 1, 2, .., n \qquad (2.1)$$

Το σημείο ισορροπίας σε ένα παίγνιο, εφόσον φυσικά υπάρχει, είναι πάντα το μικρότερο στοιχείο της σειράς και το μεγαλύτερο της στήλης στην οποία ανήκει. Σημείο

ισορροπίας υπάρχει όταν κανένας από τους δύο παίκτες δεν επιθυμεί να αλλάξει τη στρατηγική του, ακόμη κι όταν γνωρίζει τη στρατηγική του αντιπάλου του.

Υπάρχουν ωστόσο και περιπτώσεις παιγνίων δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος όπου το σημείο $\max_i \min_j a_{ij}$ δεν είναι ίδιο με το σημείο $\min_j \max_i a_{ij}$. Τότε δεν υπάρχει σημείο ισορροπίας, δηλαδή δεν επιτυγχάνεται σταθερή λύση με τη χρήση αμιγών στρατηγικών. Η επίλυση αυτών των παιγνίων γίνεται με τη χρήση μικτής στρατηγικής, που θα μελετηθεί σε επόμενη υποενότητα.

2.3.1.2 Κυρίαρχη στρατηγική

Εξετάζοντας και πάλι τον πίνακα 2.1, γίνεται αντιληπτό ότι η στρατηγική A_1 αποφέρει τα μέγιστα κέρδη στον παίκτη Α, ανεξάρτητα από την επιλογή του παίκτη Β. Για το λόγο αυτό λέμε ότι η στρατηγική A_1 κυριαρχεί τη στρατηγική A_2 ή ότι η A_2 είναι υποδεέστερη της A_1 . Αντίστοιχα, για τον παίκτη Β η στρατηγική B_1 είναι υποδεέστερη της B_2 καθώς οι απώλειες από αυτήν είναι μεγαλύτερες ανεξάρτητα από την επιλογή του παίκτη Α. Όταν μία στρατηγική ενός είναι υποδεέστερη κάποιας άλλης, τότε μπορεί να αφαιρεθεί από τον πίνακα πληρωμών καθώς ο παίκτης δεν έχει κανένα λόγο να την επιλέξει.

Γενικός κανόνας είναι ότι **μια σειρά είναι υποδεέστερη μιας άλλης**, όταν όλα τα στοιχεία της είναι μικρότερα ή ίσα από τα αντίστοιχα στοιχεία της άλλης σειράς, ενώ **μια στήλη είναι υποδεέστερη μιας άλλης στήλης** , όταν όλα τα στοιχεία της είναι μεγαλύτερα ή ίσα από τα αντίστοιχα στοιχεία της άλλης στήλης.

Ο κανόνας της κυριαρχίας χρησιμοποιείται κυρίως όταν οι διαστάσεις του πίνακα πληρωμών είναι μεγάλες, και οδηγεί στη συρρίκνωσή του σε βαθμό που η βέλτιστη λύση μπορεί να προσδιοριστεί ευκολότερα.

2.3.2. Μικτή Στρατηγική

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκαν παίγνια δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος, στα οποία οι παίκτες ακολουθούσαν αμιγή στρατηγική. Πολλές φορές όμως δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί σημείο ισορροπίας με χρήση αμιγών στρατηγικών. Για αυτόν τον τύπο παιγνίων, είναι πιθανό να επιτευχθεί μία σταθερή λύση αν οι παίκτες ακολουθήσουν μικτές

στρατηγικές, δηλαδή επιλέγουν τις εναλλακτικές στρατηγικές τους με πιθανότητα μικρότερη της μονάδας.

Ως ένα παράδειγμα χρήσης μικτών στρατηγικών, μπορεί να θεωρηθεί μία εταιρία στην οποία διοίκηση και εργαζόμενοι βρίσκονται σε διαπραγματεύσεις για τα συμβόλαια των δευτέρων. Ο πίνακας πληρωμών για τις δύο πλευρές είναι ο πίνακας 2.2 και τα στοιχεία του αντιστοιχούν στην αύξηση, σε λεπτά, που θα λάβουν οι εργαζόμενοι. Αποτελούν δηλαδή κέρδος για τους εργαζομένων και απώλειες για τη διοίκηση.

Πίνακας 2.2 Πίνακας πληρωμών παιγνίου διαπραγμάτευσης συμβολαίου

		Στρατηγικές της Διοίκησης			
		B_1	B_2	B_3	B_4
Στρατηγικές των εργαζομένων	A_1	75	105	65	45
	A_2	70	60	55	40
	A_3	80	90	35	50
	A_4	95	100	50	55

Αντικειμενικός σκοπός των εργαζομένων είναι η μεγιστοποίηση των κερδών τους, ενώ για τη διοίκηση η ελαχιστοποίηση των απωλειών. Επόμενο είναι λοιπόν οι εργαζόμενοι να ακολουθήσουν στρατηγική maximin και η διοίκηση στρατηγική minimax. Εφαρμόζοντας τη στρατηγική αυτή προκύπτει $\max_i \min_j a_{ij} = 55 \neq 50 = \min_j \max_i a_{ij}, i = 1,2,3,4,\ j = 1,2,3,4$.

Είναι λοιπόν φανερό ότι στο παίγνιο δεν υπάρχει σημείο ισορροπίας. Υποθέτοντας ότι το συνδικάτο επιλέγει τη στρατηγική A_4, η διοίκηση αμέσως θα αποκριθεί αλλάζοντας τη στρατηγική B_4 με τη B_3 προκειμένου να ελαττώσει τις απώλειές της. Μόλις αντιληφθεί αυτήν την κίνηση της διοίκησης, το συνδικάτο θα επιλέξει τη στρατηγική A_1, κερδίζοντας έτσι 65 λεπτά. Αυτή η κίνηση πάλι θα προκαλέσει αλλαγή στρατηγικής από τη διοίκηση και επιλογή της B_4, προκειμένου να ελαχιστοποιήσει εκ νέου τις απώλειες. Τότε το συνδικάτο θα επιλέξει τη στρατηγική A_4 και η διαδικασία θα ξεκινήσει από την αρχή. Το παίγνιο θα καταλήξει επομένως σε έναν αέναο βρόχο. Η στρατηγική λοιπόν maximin (minimax) δεν οδηγεί σε σταθερή λύση καθώς μόνιμα ένας από τους δύο παίκτες θα είναι δυσαρεστημένος.

Πίνακας 2.3 Κλειστός βρόχος του κριτηρίου minimax (maximin)

		Στρατηγικές της Διοίκησης				Ελάχιστο σειράς
		B_1	B_2	B_3	B_4	
Στρατηγικές των εργαζομένων	A_1	75	105	65	45	45
	A_2	70	60	55	40	40
	A_3	80	90	35	50	35
	A_4	95	100	**50**	**55**	50 (max)
Μέγιστο στήλης		95	105	65	55 (min)	

Στον κλειστό βρόχο του παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι οι μόνες στρατηγικές που συμμετέχουν είναι οι A_1 και A_4 για τον Α και οι B_3 και B_4 για τον Β. Αυτό επιβεβαιώνεται και με εφαρμογή του κανόνα της κυριαρχίας, οπότε οι υποδεέστερες στρατηγικές μπορούν να αφαιρεθούν και ο πίνακας πληρωμών να μετατραπεί στον 2x2 πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4 Ελαττωμένος πίνακας πληρωμών

		Στρατηγικές της Διοίκησης	
		B_3	B_4
Στρατηγικές των εργαζομένων	A_1	65	45
	A_4	50	55

Η μέθοδος της μικτής στρατηγικής θεωρεί ότι κάθε παίκτης πρέπει να προσδιορίσει την πιθανότητα με την οποία θα επιλέγει κάθε στρατηγική του, ώστε να μεγιστοποιήσει το ελάχιστο προσδοκώμενο κέρδος (ελαχιστοποιήσει τη μέγιστη προσδοκώμενη ζημία) ανεξάρτητα από τις επιλογές του αντιπάλου του.

Οι πιθανότητες με τις οποίες το συνδικάτο πρέπει να επιλέγει τις στρατηγικές A_1 και A_4, μπορούν να υπολογιστούν θεωρώντας ότι τα κέρδη στις δύο περιπτώσεις θα είναι τα ίδια ανεξάρτητα από την επιλογή της διοίκησης.

Αν για παράδειγμα η διοίκηση επιλέξει να ακολουθήσει τη στρατηγική B_3, τότε τα πιθανά κέρδη για το συνδικάτο θα είναι 65 και 50. Αν τώρα το συνδικάτο ακολουθεί τη στρατηγική A_1 με πιθανότητα p, και συνεπώς τη στρατηγική A_2 με πιθανότητα (1-p), τότε το προσδοκώμενο κέρδος του συνδικάτου, που συμβολίζεται με $V(A,B_3)$, θα είναι :

$$V(A,B_3) = p \times 65 + (1-p) \times 50 \qquad (2.2)$$

Αντίστοιχα αν η διοίκηση ακολουθήσει τη στρατηγική B4, το προσδοκώμενο κέρδος $V(A,B_4)$ θα είναι :

$$V(A,B_4) = p \times 45 + (1-p) \times 55 \qquad (2.3)$$

Για να βρεθεί η βέλτιστη μικτή στρατηγική του συνδικάτου, θα πρέπει το προσδοκώμενο κέρδος να είναι το ίδιο για κάθε στρατηγική που μπορεί να ακολουθήσει η διοίκηση. Πρέπει δηλαδή :

$$V(A,B_3) = V(A,B_4) \Rightarrow p \times 65 + (1-p) \times 50 = p \times 45 + (1-p) \times 55 \Rightarrow 25p = 5 \Rightarrow p = \frac{1}{5} = 0.2 \qquad (2.4)$$

Συνεπώς οι εργαζόμενοι πρέπει να ακολουθούν τη στρατηγική A_1 με πιθανότητα 20% και τη στρατηγική A_4 με πιθανότητα 80%, ώστε να αποκομίζουν τα ίδια οφέλη ανεξάρτητα από την επιλογή της διοίκησης. Δηλαδή στις δέκα φορές που παίζεται το παίγνιο δύο φορές πρέπει να ακολουθούν τη στρατηγική A_1 και οκτώ φορές τη στρατηγική A_4. Το προσδοκώμενο κέρδος των εργαζομένων θα είναι :

$$V(A) = V(A,B_3) = V(A,B_4) = 0.2 \times 65 + 0.8 \times 50 = 0.2 \times 45 + 0.8 \times 55 = 53.0$$

Αντίστοιχα, θεωρώντας ότι η διοίκηση επιλέγει τη στρατηγική B_3 με πιθανότητα q, και συνεπώς τη B_4 με πιθανότητα (1-q) προκύπτουν με ανάλογο τρόπο οι παρακάτω εξισώσεις :

$$V(A_1,B) = q \times 65 + (1-q) \times 45 \qquad (2.5)$$

$$V(A_4,B) = q \times 50 + (1-q) \times 55 \qquad (2.6)$$

$$V(A_1,B) = V(A_4,B) \Rightarrow q \times 65 + (1-q) \times 45 = q \times 50 + (1-q) \times 55 \Rightarrow 25q = 10 \Rightarrow q = \frac{2}{5} = 0.4 \qquad (2.4)$$

Επομένως η διοίκηση πρέπει να ακολουθεί τη στρατηγική B_3 με πιθανότητα 40% και τη στρατηγική B_4 με πιθανότητα 60%, δηλαδή στις δέκα φορές που παίζεται το παίγνιο τις τέσσερις φορές θα επιλέγει τη B_3 και τις έξι φορές τη B_4. Οι προσδοκώμενες απώλειες της διοίκησης θα είναι :

$$V(B) = V(B, A_1) = V(B, A_4) = 0.4 \times 65 + 0.6 \times 45 = 0.4 \times 50 + 0.6 \times 55 = 53.0$$

Οι προσδοκώμενες απώλειες της διοίκησης είναι ίδιες με τα προσδοκώμενα κέρδη των εργαζομένων, κάτι αναμενόμενο αφού πρόκειται για παίγνιο δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος. Η τιμή V = 53 αποτελεί και την τιμή του παιγνίου. Αυτό βέβαια δε σημαίνει πως κάθε φορά που οι δύο πλευρές βρίσκονται σε διαπραγμάτευση οι εργαζόμενοι θα πετυχαίνουν αύξηση 53 λεπτών, αλλά ότι αν διοίκηση και εργαζόμενοι βρεθούν πολλές φορές σε διαπραγμάτευση το προσδοκώμενο κέρδος των εργαζομένων θα είναι 53, όσες και οι απώλειες της διοίκησης.

2.3.3 Χαρακτηριστικά παραδείγματα και εφαρμογές παιγνίων δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος

Στην υποενότητα αυτή θα παρουσιαστούν ορισμένα χαρακτηριστικά παίγνια δύο παικτών μηδενικού αθροίσματος, καθώς επίσης και κάποιες εφαρμογές. Η κατηγορία αυτών των παιγνίων παρότι δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο τα παίγνια μη-μηδενικού αθροίσματος, παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον.

Ένα άλλο κοινό χαρακτηριστικό των παιγνίων που παρουσιάζονται είναι πως είναι συμμετρικά. ***Ένα παίγνιο καλείται συμμετρικό αν για τον πίνακα πληρωμών του ισχύει η σχέση*** $a_{i,j} = -a_{j,i}, i = 1, 2, .., m, j = 1, 2, .., n$***, όπου*** $\alpha_{i,j}$ ***είναι το στοιχείο του πίνακα της i-σειράς και της j-στήλης. Κάθε συμμετρικό παίγνιο είναι δίκαιο, έχει δηλαδή τιμή παιγνίου μηδέν, και οι στρατηγικές maximin και minimax είναι ίδιες.***

1. Παίγνια με νομίσματα

Αρχικά θα αναφερθεί ένα πολύ γνωστό σε όλους παίγνιο με νομίσματα το γνωστό «κορώνα- γράμματα» ή, μετά την κατάρρευση της βασιλείας στη χώρα μας και την αντικατάσταση και των νομισμάτων, «κεφαλή-γράμματα». Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία πιο σύνθετη παραλλαγή του ίδιου παιγνίου.

Παράδειγμα 2.1

Δύο παίκτες κρατούν ο καθένας από ένα νόμισμα και το δείχνουν ταυτόχρονα. Αν και τα δύο νομίσματα "δείξουν" το ίδιο, δηλαδή και τα δύο κεφαλή ή και τα δύο γράμματα, ο παίκτης Α παίρνει και τα δύο νομίσματα. Διαφορετικά τα παίρνει ο Β.

Λύση

Είναι φανερό ότι το παίγνιο αυτό είναι δίκαιο, υπό την έννοια ότι κανείς από τους δύο παίκτες δεν έχει κάποιο πλεονέκτημα έναντι του άλλου. Ειδικά αν το παίγνιο παίζεται μία φορά κανείς από τους δύο δε μπορεί να εφαρμόσει μία καλή στρατηγική που θα βελτιώσει τη θέση του, ή θα κάνει κάποια λανθασμένη κίνηση που θα την επιδεινώσει.

Η κατάσταση ωστόσο αλλάζει αν το παίγνιο παιχτεί πολλές φορές. Παρότι το παίγνιο είναι συμμετρικό, και κανείς από τους δύο δε μπορεί να εφαρμόσει κάποια στρατηγική που θα του εξασφαλίσει κάποιο πλεονέκτημα, υπάρχει το ενδεχόμενο λάθος χειρισμού. Τέτοια περίπτωση είναι ο παίκτης Α να επιλέξει κάποιες συνεχόμενες φορές την κεφαλή του νομίσματος. Τότε ο παίκτης Β σαφώς θα αποκτήσει ένα πλεονέκτημα παίζοντας γράμματα.

Είναι ζήτημα απλής λογικής να αντιληφθεί κάποιος ότι πρέπει να παίζει 50 % κεφαλή και 50% γράμματα, κάνοντας έτσι την επιλογή του μη προβλέψιμη. Ένας τρόπος για να το κάνει αυτό είναι απλώς να στρίβει το νόμισμα, αντί να αποφασίζει κάθε φορά ποια πλευρά θα δείξει.

Τις παραπάνω λογικές διαπιστώσεις επιβεβαιώνει και μια πρόχειρη ματιά στον πίνακα πληρωμών του παιγνίου, απ' όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι το παίγνιο είναι συμμετρικό, και ότι οι αμιγείς στρατηγικές maximin και minimax δε δίνουν σταθερή λύση. Η λύση δίνεται με μικτή στρατηγική, που εύκολα υπολογίζεται ότι και για τους δύο παίκτες είναι η [1/2,1/2].

Πίνακας 2.5 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου «κεφαλή-γράμματα»

		Παίκτης Β	
		Κεφαλή	Γράμματα
Παίκτης Α	Κεφαλή	1	-1
	Γράμματα	-1	1

Παράδειγμα 2.2

Ένα δίκαιο νόμισμα ρίχνεται και το αποτέλεσμα γίνεται γνωστό στον παίκτη Α. Αυτός πρέπει να αποφασίσει αν θα ποντάρει ή αν θα παίξει πάσο. Αν παίξει πάσο πληρώνει στον παίκτη Β 1€. Αν ποντάρει, τότε ο παίκτης Β, που δε γνωρίζει το αποτέλεσμα της ρίψης, μπορεί να παίξει πάσο ή να ποντάρει κι αυτός. Αν πάει πάσο, τότε πληρώνει αυτός 1€ στον παίκτη Α.

Αν ποντάρει τότε το νόμισμα ξαναρίχνεται, κι αν έρθει κεφαλή πληρώνει στον παίκτη Α 2€, διαφορετικά λαμβάνει 2 € από τον παίκτη Α. Να βρεθεί , αν υπάρχει, η βέλτιστη λύση του παιγνίου.

Λύση

Οι στρατηγικές του παίκτη Α είναι οι εξής. **PP**, δηλαδή πάσο στην κεφαλή και πάσο στα γράμματα, **PB**, δηλαδή πάσο στην κεφαλή και ποντάρισμα στα γράμματα, **BP**, δηλαδή ποντάρισμα στην κεφαλή και πάσο στα γράμματα, και, **BB**, δηλαδή ποντάρισμα στην κεφαλή και ποντάρισμα στα γράμματα. Στον πίνακα 2.6 υπολογίζονται τα προσδοκώμενα οφέλη του παίκτη Α, σε σχέση και με τις κινήσεις του παίκτη Β.

Πίνακας 2.6 Υπολογισμός προσδοκώμενου οφέλους για τον παίκτη Α

Προσδοκώμενο όφελος του παίκτη Α			
PP vs B	$\frac{1}{2}\times(-1)+\frac{1}{2}\times(-1)=-1$	***BP vs B***	$\frac{1}{2}\times(2)+\frac{1}{2}\times(-1)=0.50$
PP vs P	$\frac{1}{2}\times(-1)+\frac{1}{2}\times(-1)=-1$	***BP vs P***	$\frac{1}{2}\times(1)+\frac{1}{2}\times(-1)=0$
PB vs B	$\frac{1}{2}\times(-1)+\frac{1}{2}\times(-2)=-1.50$	***BB vs B***	$\frac{1}{2}\times(2)+\frac{1}{2}\times(-2)=0$
PB vs P	$\frac{1}{2}\times(-1)+\frac{1}{2}\times(1)=0$	***BB vs P***	$\frac{1}{2}\times(1)+\frac{1}{2}\times(1)=1$

Για παράδειγμα αν ο παίκτης Α επιλέξει BP και ο παίκτης Β ποντάρει, δηλαδή Β. Το νόμισμα ρίχνεται για δεύτερη φορά και έρχεται κεφαλή με πιθανότητα 50%, και ο παίκτης Α κερδίζει 2€ από τον παίκτη Β. Υπάρχει όμως και πιθανότητα 50% να έρθουν γράμματα, οπότε ο παίκτης Α δίνει 1€ στον παίκτη Β. Για το λόγο αυτό τα αναμενόμενα κέρδη για τον παίκτη Α είναι $\frac{1}{2}\times(2)+\frac{1}{2}\times(-1)=0.50$.

Ο πίνακας πληρωμών του παιγνίου είναι ο πίνακας 2.7 και παρατηρώντας τον εύκολα μπορεί να διαπιστώσει κάποιος ότι $\max_i \min_j a_{ij}=0\neq\frac{1}{2}=\min_j \max_i a_{ij}, i=1,2,3,4, j=1,2$, δηλαδή το παίγνιο δεν έχει σημείο ισορροπίας και συνεπώς δεν επιλύεται με χρήση αμιγών στρατηγικών. Επιπλέον, οι στρατηγικές PP και PB του παίκτη Α είναι υποδεέστερες των άλλων δύο στρατηγικών και μπορούν να αφαιρεθούν από τον πίνακα πληρωμών. Ο νέος πίνακας πληρωμών είναι ο πίνακας 2.8.

Πίνακας 2.7 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου

		Στρατηγικές του παίκτη Β		
		Β	Ρ	Ελάχιστο σειράς
Στρατηγικές του παίκτη Α	ΡΡ	-1	-1	-1
	ΡΒ	-1.5	0	-1.5
	ΒΡ	0.5	0	0
	ΒΒ	0	1	0
	Μέγιστο στήλης	0.5	1	

Πίνακας 2.8. Πίνακας πληρωμών μετά την αφαίρεση υποδεέστερων στρατηγικών

		Στρατηγικές του παίκτη Β		
		Β	Ρ	Ελάχιστο σειράς
Στρατηγικές του παίκτη Α	ΒΡ	0.5	0	0
	ΒΒ	0	1	0
	Μέγιστο στήλης	0.5	1	

Αν λοιπόν το παίγνιο έχει σταθερή λύση, αυτή θα βρίσκεται με χρήση μικτής στρατηγικής. Έστω ότι ο παίκτης Α ακολουθεί τη στρατηγική ΒΡ με πιθανότητα p και τη στρατηγική ΒΒ με πιθανότητα (1-p), έτσι ώστε :

$$V(A,B)=V(A,P)\Rightarrow p\times\frac{1}{2}+(1-p)\times 0=p\times 0+(1-p)\times 1\Rightarrow\frac{3}{2}p=1\Rightarrow p=\frac{2}{3} \qquad (2.5)$$

δηλαδή στις 30 φορές που παίζεται το παίγνιο τις 20 θα παίζει πάσο και τις 10 θα ποντάρει. Το προσδοκώμενο κέρδος του παίκτη Α, θα είναι :

$$V(A)=V(A,B)=V(A,P)=\frac{2}{3}\times\frac{1}{2}+\frac{1}{3}\times 0=\frac{1}{3}=\frac{2}{3}\times 0+\frac{1}{3}\times 1 \qquad (2.6)$$

Αντίστοιχα, θεωρώντας για τον παίκτη Β ότι ποντάρει (Β) με πιθανότητα q και παίζει πάσο(Ρ) με πιθανότητα (1-q), προκύπτει:

$$V(B,BP)=V(B,BB)\Rightarrow q\times\frac{1}{2}+(1-q)\times 0=q\times 0+(1-q)\times 1\Rightarrow\frac{3}{2}q=1\Rightarrow q=\frac{2}{3} \qquad (2.7)$$

δηλαδή στις 30 φορές που παίζεται το παίγνιο τις 20 θα ποντάρει και τις 10 θα παίζει πάσο. Οι προσδοκώμενες απώλειες του παίκτη Β, θα είναι :

$$V(B)=V(B,BP)=V(B,BB)=\frac{2}{3}\times\frac{1}{2}+\frac{1}{3}\times 0=\frac{1}{3}=\frac{2}{3}\times 0+\frac{1}{3}\times 1 \qquad (2.8)$$

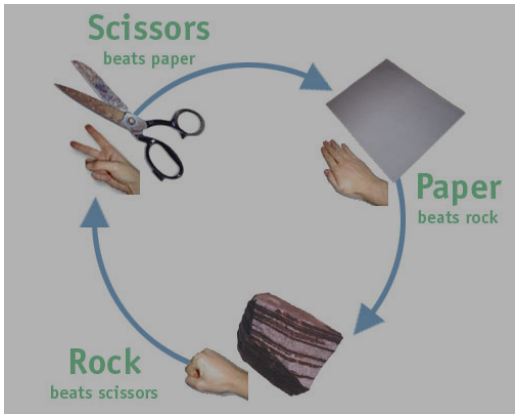
Παρατηρούμε δηλαδή ότι η βέλτιστη μικτή στρατηγική είναι η ίδια και για τους δύο παίκτες.

2. Το παίγνιο "Πέτρα- Ψαλίδι -Χαρτί"

Πρόκειται για ένα πολύ γνωστό παίγνιο, που σίγουρα οι περισσότεροι θα έχουν παίξει στην παιδική τους ηλικία και είναι ευρέως διαδεδομένο σε όλη την υφήλιο. Από τις Η.Π.Α.(rock-paper-scissors) έως την Άπω Ανατολή, δηλαδή την Ιαπωνία (jan-ken-pon) και την Κίνα (ching-chang-wulla).

Παράδειγμα 2.3

Δύο παίκτες κοιτάζονται κατάματα και σχηματίζουν με τα δάχτυλά τους ένα από τα τρία ακόλουθα σχήματα. Μία γροθιά, που αντιστοιχεί στην πέτρα, το δείκτη και το μέσο παρατεταμένους, που συμβολίζουν το ψαλίδι και την παλάμη ανοικτή προς το έδαφος που συμβολίζει το χαρτί. Η πέτρα κερδίζει το ψαλίδι, καθώς μπορεί να το σπάσει, το ψαλίδι κερδίζει το χαρτί καθώς μπορεί να το κόψει, και το χαρτί κερδίζει την πέτρα, αφού μπορεί να τη σκεπάσει. Ο νικητής κερδίζει 1€, ενώ σε περίπτωση ισοπαλίας, οι παίκτες δε δίνουν ούτε και παίρνουν νομίσματα. Ποια είναι η βέλτιστη λύση του παιγνίου;



Λύση

Το παίγνιο αυτό έχει όμοια χαρακτηριστικά με τα παίγνια νομισμάτων. Κανείς από τους δύο παίκτες δε μπορεί να θεωρηθεί ότι κάνει μία καλή ή κακή κίνηση όταν το παίγνιο παίζεται

μία μόνο φορά. Όταν όμως το παίγνιο επαναληφθεί αρκετές φορές, οι παίκτες μπορούν να χαράξουν κάποια στρατηγική που θα τους εξασφαλίσει συγκριτικό πλεονέκτημα.

Όπως εύκολα θα αντιληφθεί κάποιος, η βέλτιστη στρατηγική στο παίγνιο είναι η τυχαία επιλογή, καθώς κανένας από τους δύο παίκτες δεν έχει λόγο να προτιμήσει συγκεκριμένη επιλογή με δεδομένο ότι καθεμία από αυτές του δίνει ίδια πιθανότητα επιτυχίας. Τη διαπίστωση αυτή έρχεται να επιβεβαιώσει ο πίνακας πληρωμών του παιγνίου, ο πίνακας 2.9.

Πίνακας 2.9 Πίνακας πληρωμών παιγνίου "Πέτρα – Ψαλίδι- Χαρτί"

		Παίκτης Β		
		Π	**Ψ**	**Χ**
Παίκτης Α	**Π**	0	1	-1
	Ψ	-1	0	1
	Χ	1	-1	0

3. Το παίγνιο "Morra"

Πρόκειται για ένα παίγνιο ευρύτατα διαδεδομένο στην Ιταλία, που όπως και το προηγούμενο έτσι κι αυτό είναι ένα παίγνιο που παίζεται με τα χέρια. Η προέλευσή του ανάγεται στην Αρχαία Ελλάδα και τη Ρώμη, δηλαδή χιλιάδες χρόνια πριν. Το παίγνιο παίζεται σε διάφορες παραλλαγές, ανάλογα και με τον αριθμό των δακτύλων που χρησιμοποιούνται. Στο παράδειγμα μας θα εξετάσουμε τη μορφή του παιγνίου που παίζεται με χρήση δύο δακτύλων από κάθε παίκτη.

Παράδειγμα 2.4

Δύο παίκτες ταυτόχρονα υψώνουν ένα ή δύο δάκτυλα, και φωνάζουν έναν αριθμό. Ο παίκτης που θα φωνάξει τον αριθμό του συνολικού αθροίσματος των υψωμένων δακτύλων των δύο παικτών, κερδίζει τον ίδιο αριθμό νομισμάτων ενός € από τον αντίπαλό του. Στην περίπτωση που κανένας από τους δύο παίκτες δεν προσδιορίσει το άθροισμα, δεν υπάρχει καμία δοσοληψία. Να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση του παιγνίου.

Λύση

Αρχικά θα γίνουν κάποιες εύλογες παρατηρήσεις. Θα ήταν ανόητο να εκφωνήσει κάποιος παίκτης έναν αριθμό που είναι απίθανο να ισούται με το συνολικό άθροισμα των δακτύλων. Για παράδειγμα ένας παίκτης που σηκώνει ένα μόνο δάκτυλο είναι λογικό να φωνάξει μόνο "΄δύο" ή "τρία", και όχι "τέσσερα". Αντίστοιχα ο παίκτης που σηκώνει δύο δάκτυλα είναι ευνόητο να φωνάξει "τρία" ή "τέσσερα". Συνεπώς κάθε παίκτης έχει στην πραγματικότητα μόνο τέσσερις επιλογές και τα πιθανά αποτελέσματα του παιγνίου φαίνονται στον πίνακα πληρωμών 2.10, όπου στην επιλογή (i, j) το i συμβολίζει τον αριθμό των δακτύλων και το j, τον αριθμό που φωνάζει ο παίκτης.

Πίνακας 2.10 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου Morra

		Παίκτης Β			
		(1,2)	(1,3)	(2,3)	(2,4)
Παίκτης Α	(1,2)	0	2	-3	0
	(1,3)	-2	0	0	3
	(2,3)	3	0	0	-4
	(2,4)	0	-3	4	0

Το παίγνιο αυτό, όπως και τα προηγούμενα που αναφέρθηκαν είναι συμμετρικό. Κανένας παίκτης δεν έχει κάποιο φανερό πλεονέκτημα. Θα ήταν λοιπόν εύλογο να θεωρηθεί ότι όταν το παίγνιο επαναλαμβάνεται πολλές φορές, κάθε παίκτης πρέπει να κάνει τυχαία τις επιλογές του και με συχνότητα 1/4. Αυτό ωστόσο αποδεικνύεται μια κακή στρατηγική.

Αν ο παίκτης Α έπαιζε με τον προαναφερθέντα τρόπο, τότε ο παίκτης Β θα μπορούσε να εξασφαλίσει τη νίκη του, ακολουθώντας συνεχώς την επιλογή (1,3). Πράγματι στην περίπτωση αυτή το προσδοκώμενο κέρδος για τον παίκτη Α θα ήταν:

$V\left\{A,(1,3)\right\} = \frac{1}{4}\times 2 + \frac{1}{4}\times 0 + \frac{1}{4}\times 0 + \frac{1}{4}\times(-3) = -\frac{1}{4}$, δηλαδή ζημία 0.25 για τον παίκτη Α και συνεπώς κέρδος 0.25 για τον παίκτη Β.

Συνεπώς, παίζοντας και οι δύο παίκτες με τον παραπάνω τρόπο, ο παίκτης Β προσδοκά να κερδίζει κατά μέσο όρο 25 λεπτά ανά παίγνιο. Το παίγνιο αυτό λοιπόν διαφέρει από τα προηγούμενα καθώς δείχνει ότι η ίση κατανομή των κερδών μεταξύ των δύο παικτών δεν εξασφαλίζεται από την επιλογή των διάφορων στρατηγικών με την ίδια συχνότητα.

Επειδή το παίγνιο είναι συμμετρικό, η τιμή του παιγνίου θα είναι V= 0. Πράγματι αυτό προκύπτει και από την επίλυση του παιγνίου (Saul (1999)), απ' όπου προκύπτει ότι η βέλτιστη στρατηγική για τον παίκτη Α είναι οποιαδήποτε στρατηγική της μορφής {0,p,(1-p),0}. Τέτοιες στρατηγικές είναι τόσο η (0,0.6,0.4,0) όσο και η (0,4/7,3/7,0). Τα ίδια ισχύουν και για τον παίκτη Β. Οι δύο παίκτες δηλαδή πρέπει να επιλέγουν μεταξύ των επιλογών (1,3) και (2,3) ενώ ποτέ δε θα διαλέγουν τις επιλογές (1,2) και (2,4).

4. Το παίγνιο του Blotto

Τα παίγνια Blotto, ή ακριβέστερα τα παίγνια του συνταγματάρχη Blotto, αποτελούν μία κατηγορία παιγνίων δύο-παικτών μηδενικού-αθροίσματος, όπου οι παίκτες πρέπει να πετύχουν τη βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων πόρων τους. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα παίγνια , δε χρησιμοποιείται πίνακας πληρωμών για την επίλυση τους.

Όπως προαναφέρθηκε η ονομασία τους οφείλεται στο μυθιστορηματικό συνταγ-ματάρχη Blotto, ο οποίος έπρεπε να πετύχει τη βέλτιστη κατανομή των στρατιωτών του σε N πεδία μάχης, υπό τις εξής προϋποθέσεις:

- Σε κάθε πεδίο μάχης νικήτρια είναι η πλευρά που διαθέτει τους περισσότερους στρατιώτες.
- Οι δύο πλευρές δε γνωρίζουν πως κατανέμει τους στρατιώτες του ο αντίπαλος.
- Νικήτρια είναι η πλευρά που θα πετύχει την πλειοψηφία των νικών στα N πεδία μάχης.

Ως ένα απλό παράδειγμα παιγνίου Blotto μπορεί να θεωρηθεί η περίπτωση όπου δύο παίκτες πρέπει να τοποθετήσουν τρεις θετικούς ακέραιους σε μη φθίνουσα σειρά, το άθροισμα δε των τριών αυτών αριθμών να είναι σταθερό και ίσο με S. Ο παίκτης που έχει δύο αριθμούς μεγαλύτερους από τους αντίστοιχους αριθμούς του αντιπάλου είναι ο νικητής του παιγνίου.

Για S= 6 υπάρχουν τρεις δυνατοί συνδυασμοί: οι (2,2,2), (1,2,3), (1,1,4). Το (1,1,4) και το (1,2,3) είναι ισοδύναμα. Το (1,2,3) και το (2,2,2) είναι ισοδύναμα, ενώ το (2,2,2) νικά το (1,1,4). Επομένως η βέλτιστη επιλογή είναι το (2,2,2) με μία νίκη και μία ισοπαλία. Τα πράγματα γίνονται περισσότερο περίπλοκα όσο το S αυξάνει. Για S=12 αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη στρατηγική είναι η (2,4,6) ενώ για S=13 απαιτείται μικτή στρατηγική (3, 5, 5), (3, 3, 7) και (1, 5, 7), με ίση πιθανότητα 1/3.

Μάλιστα όσο αυξάνει το άθροισμα S, τόσο πιο πολύπλοκο, αλλά συνάμα και ελκυστικό για πολλούς, γίνεται το παίγνιο. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του διαγωνισμού που πραγματοποιήθηκε στις Η.Π.Α. με πολύ μεγάλη συμμετοχή. Το πρόβλημα ήταν η κατανομή των 100 διμοιριών που είχε στη διάθεσή του ο συνταγματάρχης Blotto σε 10 διαφορετικά σημεία μάχης με τέτοιο τρόπο, που θα του εξασφάλιζε τη νίκη έναντι του αντιπάλου του.

Όπως είναι λογικό, όποια από τις δύο πλευρές συγκεντρώσει τις περισσότερες διμοιρίες σε κάθε πεδίο μάχης, αυτή θα είναι η νικήτρια. Αυτός που θα σημειώσει τις περισσότερες νίκες στο σύνολο των 10 πεδίων μάχης, θα είναι και ο τελικός νικητής του παιγνίου. Τελικά μεταξύ των χιλιάδων προτάσεων που δόθηκαν, βέλτιστη λύση αποδείχθηκε η (17,3,17,3,17,3,17, 3,17,3), που στο σύνολο των 106 επαναλήψεων του παιγνίου πέτυχε 64 νίκες, ήρθε 33 φορές ισόπαλη και είχε και 9 ήττες.

5. Παίγνια σε στρατιωτικές επιχειρήσεις

Από τη μέχρι τώρα παρουσίαση έγινε ξεκάθαρο πως η θεωρία παιγνίων επιτρέπει σε έναν παίκτη να προσδιορίσει τη βέλτιστη γι' αυτόν στρατηγική σε ένα συγκεκριμένο παίγνιο. Πραγματοποιώντας ετυμολογική ανάλυση της λέξης «στρατηγική» (στρατός + άγω), προσδιορίζεται η προέλευση της. Θα ήταν λοιπόν παράλογο να μην υπάρχουν εφαρμογές της θεωρίας παιγνίων, κι ευρύτερα της επιχειρησιακής έρευνας στον κλάδο του «δημιουργού» τους, του στρατού.

Ένα κλασσικό στρατιωτικό πρόβλημα είναι η στόχευση ενός κινούμενο στόχου, ο οποίος μετακινείται σκόπιμα ώστε να μη γίνει αντιληπτή η θέση του. Ο κινούμενος στόχος μπορεί να είναι ένα πλοίο, ένα αεροπλάνο, ή ένας στρατιώτης. Ο σκοπευτής είναι ένα βομβαρδιστικό αεροπλάνο, ένα αντιαεροπορικό όπλο ή ένας ελεύθερος σκοπευτής αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα μεταξύ της ανίχνευσης του στόχου και της εκτόξευσης του βλήματος. Ενδιάμεσα ο στόχος μπορεί να μετακινηθεί και συνεπώς ο σκοπευτής καλείται να προβλέψει με επιτυχία την επόμενη κίνηση του στόχου. Αν μάλιστα έχει στη διάθεση του ένα μόλις βλήμα, τότε η κατάσταση μπορεί να προσομοιωθεί ξεκάθαρα με ένα παίγνιο μηδενικού αθροίσματος δύο παικτών.

Ανάλογα παραδείγματα υπάρχουν πολλά, κυρίως από το χώρο της πολεμικής αεροπορίας και είναι γνωστά ως "tactical air war games". Η περιγραφή αυτών δεν εμπίπτει στους σκοπούς της παρούσας εργασίας . Για αναλυτική όμως περιγραφή τους μπορεί κάποιος να ανατρέξει στην επίσημη έκδοση του συλλεκτικού βιβλίου της RAND (Melvin Dresher (1961)).

2.4 Παίγνια δύο παικτών με 2 x n και n x 2 επιλογές

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί μία ιδιαίτερη κατηγορία παιγνίων, όπου ο ένας από τους δύο παίκτες έχει δύο μόνο αμιγείς στρατηγικές ενώ ο έτερος παίκτης n, όπου n >2.

2.4.1. Μέθοδοι επίλυσης ενός παιγνίου n x 2 και 2 x n

Πολύ συχνά στη θεωρία παιγνίων οι δύο παίκτες καλούνται να επιλέξουν μεταξύ περισσότερων από δύο στρατηγικών. Στην περίπτωση αυτή για τον προσδιορισμό της βέλτιστης μεικτής στρατηγικής τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι. Η πιο ασφαλής επίλυση γίνεται αξιοποιώντας το γραμμικό προγραμματισμό, και ειδικότερα τη μέθοδο simplex. Προφανώς όμως απαιτείται και χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Για την ειδική όμως περίπτωση όπου ο ένας από τους δύο παίκτες έχει δύο στρατηγικές και ο άλλος περισσότερες, είναι δυνατό κάνοντας χρήση μίας γραφικής μεθόδου να μετασχηματιστεί το παίγνιο από n x 2, ή 2 x n, σε 2 x 2, και στη συνέχεια να επιλυθεί με το γνωστό τρόπο. Φυσικά η παραπάνω μέθοδος εφαρμόζεται αφού πρώτα επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχει σαγματικό σημείο, δηλαδή το παίγνιο δεν επιλύεται μόνο με τη χρήση αμιγών στρατηγικών.

Η μέθοδος περιγράφεται αναλυτικά μέσα από το παράδειγμα της επόμενης ενότητας για ένα παίγνιο n x 2.

2.4.2 Χαρακτηριστικό παράδειγμα παιγνίου n x 2

Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας παιγνίων, βγαλμένο κυριολεκτικά από την καθημερινότητα, είναι αυτό των ψαράδων της Jamaica που περιγράφεται παρακάτω.

Παράδειγμα 2.6

Το παράδειγμα αυτό είναι βασισμένο στις παρατηρήσεις του ανθρωπολόγου W.C.A. Davenport, ο οποίος μελέτησε τη συμπεριφορά των κατοίκων ενός μικρού χωριού στης Jamaica, που στην πλειονότητα τους είναι ψαράδες. Στη διάθεσή τους λοιπόν έχουν 26 ψαροκάικα, στελεχωμένα από έναν καπετάνιο και τρεις ψαράδες, που ρίχνουν δίχτυα σε διάφορα σημεία. Οι χώροι αλιείας μπορούν να διαχωριστούν σε «εσωτερικούς» και «εξωτερικούς». Ως εσωτερικοί χαρακτηρίζονται εκείνοι που απέχουν 5 έως 15 μίλια από την ακτή, ενώ ως εξωτερικοί εκείνοι που απέχουν περισσότερο από 15 μίλια. Ο κρίσιμος

παράγοντας που διαχωρίζει τις δύο περιοχές αλιείας είναι η περιστασιακή ύπαρξη ισχυρών ρευμάτων, που καθιστούν αδύνατη την αλιεία στα "ανοιχτά". Κάθε καπετάνιος επομένως πρέπει να αποφασίσει πού θα ρίξει τα δίχτυα του και έχει τρεις δυνατές επιλογές:

Α. Να τοποθετήσει όλες τις παγίδες στους «εσωτερικούς» χώρους.

Β. Να τοποθετήσει όλες τις παγίδες στους «εξωτερικούς» χώρους.

Γ. Να τοποθετήσει παγίδες τόσο στους «εσωτερικούς» όσο και στους «εξωτερικούς» χώρους.

Λύση

Ο Davenport μοντελοποίησε την κατάσταση ως ένα παίγνιο δύο παικτών 3x2. Ως παίκτες θεωρούνται οι ψαράδες και η φύση. Κάθε καπετάνιος έχει τις τρεις δυνατές επιλογές που προαναφέρθηκαν. Η φύση καλείται να επιλέξει αν θα "στείλει" θαλάσσια ρεύματα ή όχι. Λαμβάνοντας υπόψη του τις συνθήκες της τοπικής αγοράς καθώς επίσης και τα πάγια έξοδα των πληρωμάτων, ο Davenport δημιούργησε τον πίνακα πληρωμών 2.11.

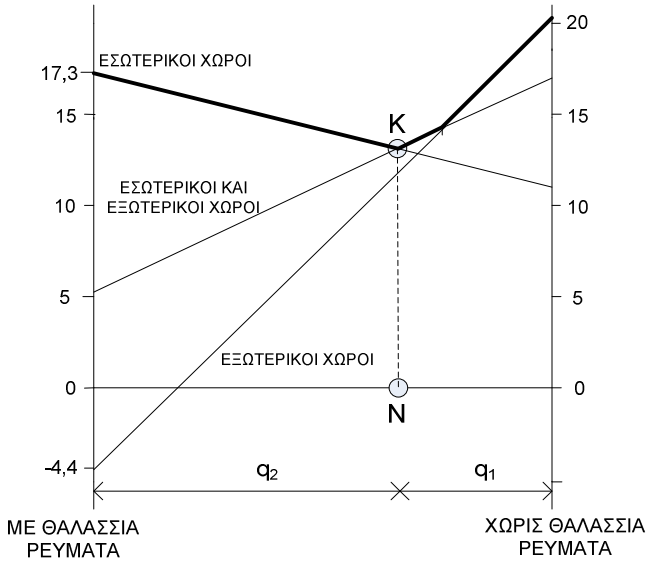
Πίνακας 2.11 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου των ψαράδων της Jamaica

		ΦΥΣΗ	
		ΜΕ ΘΑΛΛΑΣΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ	ΧΩΡΙΣ ΘΑΛΛΑΣΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ
ΨΑΡΑΔΕΣ	ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ	17.3	11.5
	ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ	5.2	17.0
	ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ	-4.4	20.6

Ως μονάδα μέτρησης θεωρείται η τοπική λίρα, και το αρνητικό πόσο προκύπτει από το γεγονός ότι ανεξάρτητα από την «ψαριά», οι καπετάνιοι πρέπει να πληρώσουν το πλήρωμα τους. Ο Davenport θεώρησε το παίγνιο μηδενικού αθροίσματος, αντιμετωπίζοντας και το περιβάλλον ως ένα λογικό παίκτη που ακολουθεί μία maximin στρατηγική, ενώ αντίστοιχα οι καπετάνιοι υιοθετούν minimax στρατηγική.

Ακολουθώντας τη γραφική μέθοδο επίλυσης του παιγνίου nx2, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα, προκύπτει η ακόλουθη γραφική παράσταση. Οι δύο «στρατηγικές» της φύσης απεικονίζονται από τους δύο κατακόρυφους άξονες, ενώ οι τρεις στρατηγικές των ψαράδων από τα τρία αντίστοιχα ευθύγραμμα τμήματα.

Οι ψαράδες, όπως είναι αναμενόμενο, ενδιαφέρονται για το μέγιστο κέρδος και συνεπώς θα κινηθούν στο επάνω τεθλασμένο ευθύγραμμο τμήμα που σημειώνεται με έντονη γραμμή. Αντίστοιχα αν θεωρηθεί ότι η φύση είναι ένας λογικός παίκτης που αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του, θα επιλέξει το σημείο N, ώστε το σημείο K να είναι το χαμηλότερο σημείο του τεθλασμένου ευθύγραμμου τμήματος.



Σχήμα 2.1 Γραφική επίλυση του παιγνίου των ψαράδων της Jamaica

Όμως το K είναι το σημείο τομής των δύο ευθύγραμμων τμημάτων, που αντιστοιχούν στην επιλογή της αλιείας μόνο στους «εσωτερικούς» χώρους, και, στην αλιεία σε «εσωτερικούς» και «εξωτερικούς» χώρους». Συνεπώς το παίγνιο μετατρέπεται από 3x2 σε 2x2, και προκύπτει ο μειωμένος πίνακας πληρωμών 2.12.

Πίνακας 2.12 Μειωμένος πίνακας πληρωμών του παιγνίου των ψαράδων

		ΦΥΣΗ	
		ΜΕ ΘΑΛΛΑΣΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ	ΧΩΡΙΣ ΘΑΛΛΑΣΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ
ΨΑΡΑΔΕΣ	ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ	17.3	11.5
	ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ	5.2	17.0

Το παίγνιο επιλύεται με χρήση μικτών στρατηγικών από τους δύο παίκτες. Έτσι αν υποτεθεί ότι οι καπετάνιοι επιλέγουν με πιθανότητα p_1 την αλιεία μόνο σε «εσωτερικούς» χώρους και με πιθανότητα p_2 την αλιεία σε «εσωτερικούς» και εξωτερικούς χώρους, ενώ η φύση στέλνει θαλάσσια ρεύματα με πιθανότητα q_1 και δεν στέλνει με πιθανότητα q_2, η βέλτιστη μικτή στρατηγική των παικτών προσδιορίζεται ως εξής :

$$V(\Psi,\Phi_1)=V(\Psi,\Phi_2)\Rightarrow p_1\times 17.3+p_2\times 5.2=p_1\times 11.5+p_2\times 17\Rightarrow 5.8p_1=11.8p_2\Rightarrow 5{,}8p_1=11{,}8\times(1-p_1)\Rightarrow$$
$$\Rightarrow 17.6p_1=11.8\Rightarrow p_1=0.67, p_2=0.33$$

$$V(\Phi,\Psi_1)=V(\Phi,\Psi_2)\Rightarrow q_1\times 17.3+q_2\times 11.5=q_1\times 5.2+q_2\times 17\Rightarrow 11.9p_1=5.5p_2\Rightarrow 11.9p_1=5.5\times(1-p_1)\Rightarrow$$
$$\Rightarrow 17.4p_1=5.5\Rightarrow p_1=0.316, p_2=0.684$$

Δηλαδή στις 100 φορές που οι καπετάνιοι θα οδηγήσουν τα καΐκια τους για ψάρεμα, τις 67 θα επιλέξουν να αλιεύσουν μόνο στους «εσωτερικούς χώρους», ενώ τις 33 θα αλιεύσουν τόσο στους «εσωτερικούς» όσο και στους «εξωτερικούς» χώρους. Αντίστοιχα αν η φύση ενεργήσει όπως ένας ορθολογικός παίκτης, στις 100 φορές τις 31 περίπου θα επιλέξει να «στείλει» θαλάσσια ρεύματα και τις 69 όχι. Η προσδοκώμενη τιμή του παιγνίου θα είναι :

$$V=V(\Psi)=V(\Phi)=0.67\times 17.3+0.33\times 5.2=13.31$$

Ουσιαστικά λοιπόν η Θεωρία Παιγνίων συνιστά στους καπετάνιους να αλιεύουν μόνο σε αποστάσεις 5-15 μιλίων σε ποσοστό 67%, ενώ να συνδυάζουν την αλιεία σε κοντινές και μακρινές αποστάσεις σε ποσοστό 33%. Με τον τρόπο αυτό θα έχουν αναμενόμενο κέρδος 13.31 τοπικές λίρες σε κάθε έξοδό τους.

Το εντυπωσιακό είναι ότι ο Davenport από τις καταγραφές του, διαπίστωσε ότι 18 από τους καπετάνιους (69%) ψάρευαν στους αποκαλούμενους «εσωτερικούς» χώρους, 8(31%) συνδύαζαν την αλιεία στους δύο χώρους, ενώ κανένας τους δεν ψάρευε μόνο στα ανοιχτά. Μία σχεδόν τέλεια ταύτιση θεωρίας και πραγματικότητας!

Μία ακόμη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι η εξής. Κατά τη διετή παραμονή του στο νησί, ο Davenport κατέγραψε την ύπαρξη θαλάσσιων ρευμάτων σε ποσοστό 25% επί των συνολικών ημερών. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μικτή στρατηγική [0.25,0.75] από την πλευρά της φύσης. Όπως όμως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.3 η βέλτιστη στρατηγική, όταν ο αντίπαλος χρησιμοποιεί μικτή στρατηγική, είναι αμιγής. Συνεπώς οι χωρικοί θα έπρεπε να επιλέξουν μεταξύ μίας εκ των τριών αμιγών στρατηγικών:

	0.25	0.75
1	17.3	11.5
0	5.2	17.0
0	-4.4	20.6

A

	0.25	0.75
0	17.3	11.5
1	5.2	17.0
0	-4.4	20.6

B

	0.25	0.75
0	17.3	11.5
0	5.2	17.0
1	-4.4	20.6

C

κάθε μία από τις οποίες έχει τις εξής προσδοκώμενες τιμές :

$$V_A = 1\times 0.25\times 17.3 + 1\times 0.75\times 11.5 = 12.95$$
$$V_B = 1\times 0.25\times 5.2 + 1\times 0.75\times 17 = 14.05$$
$$V_C = 1\times 0.25\times (-4.4) + 1\times 0.75\times 20.6 = 14.35$$

Καθότι το μέγιστο προσδοκώμενο όφελος είναι το 14.35, οι ψαράδες θα έπρεπε να αλιεύουν μόνο σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 15 μιλίων από την ακτή, στους αποκαλούμενους «εξωτερικούς» χώρους. Τέτοια ρίσκα ωστόσο είναι συνήθως ασύμβατα με την ανθρώπινη φύση.

Τέλος, θα γίνει μία ακόμη παρατήρηση σχετικά με τις στρατηγικές του παιγνίου. Σύμφωνα με τη θεωρία παιγνίων, η βέλτιστη μικτή στρατηγική της φύσης είναι η [0.31,0.69]. Αν δηλαδή η φύση λειτουργούσε όπως ένας ορθολογικός παίκτης, που ήθελε να αποδώσει όσο δυνατόν λιγότερα στους ψαράδες, θα έπρεπε να δημιουργεί ρεύματα σε ποσοστό 31 % αντί του παρατηρούμενου 25%, επί του συνόλου των ημερών. Ίσως τελικά η φύση να είναι αρκετά γενναιόδωρη με τους ανθρώπους!

2.5 Παίγνια δύο παικτών μη μηδενικού αθροίσματος

2.5.1. Εισαγωγή

Τα παίγνια μηδενικού αθροίσματος που εξετάστηκαν αναλυτικά στις προηγούμενες ενότητες επέτρεπαν την εύρεση καθολικά αποδεκτών λύσεων, που άφηναν ικανοποιημένους και τους δύο παίκτες. Υπό αυτή την έννοια παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τα πραγματικά προβλήματα της καθημερινότητας, που συνήθως δεν καταλήγουν σε αμοιβαία αποδεκτές λύσεις.

Αντίθετα στα **παίγνια μη- μηδενικού αθροίσματος (non-zero sum games),** ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας, σπάνια υπάρχει κοινά αποδεκτή λύση. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν υπάρχει κάποια στρατηγική που να υπερέχει ξεκάθαρα έναντι των υπολοίπων ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί βέλτιστη, όπως επίσης και διότι τα οφέλη των παικτών δεν είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν και ως εκ τούτου να προσδιοριστούν με ακρίβεια.

Γενικά, σε ένα παίγνιο δύο παικτών υπάρχουν τόσο ανταγωνιστικά στοιχεία όσο και στοιχεία συνεργασίας των δύο πλευρών καθώς τα συμφέροντα μπορεί να είναι άλλοτε αντικρουόμενα και άλλοτε κοινά. Σε ένα **παίγνιο μηδενικού αθροίσματος** δεν υπάρχει κανένα κοινό συμφέρον. Σε πλήρη αντιδιαστολή είναι τα **παίγνια πλήρους συνεργασίας (cooperative games)**, όπου οι δύο παίκτες έχουν μόνο κοινά συμφέροντα. Τέτοια περίπτωση αποτελούν ο κυβερνήτης ενός αεροπλάνου και ο συντονιστής του πύργου ελέγχου, οι οποίοι ουσιαστικά «παίζουν» ένα παίγνιο πλήρους συνεργασίας με ένα κοινό στόχο, την προσγείωση του αεροπλάνου. Η επίλυση αυτών των παιγνίων είναι σχετικά εύκολη και απαιτεί τον αποδοτικό συνδυασμό των κινήσεων των δύο παικτών.

Όλα τα υπόλοιπα παίγνια δύο παικτών αποτελούν μία ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των δύο ακραίων περιπτώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Παίγνια που συνδυάζουν ανταγωνιστικά στοιχεία και στοιχεία συνεργασίας είναι γενικά πιο πολύπλοκα, όμως και πιο ενδιαφέροντα καθώς συναντώνται πολύ πιο συχνά στην καθημερινή ζωή. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν ένας πωλητής αυτοκινήτων που διαπραγματεύεται με έναν πελάτη. Και οι δύο επιθυμούν την ολοκλήρωση της αγοραπωλησίας, τους χωρίζει όμως το αντίτιμο. Άλλη παρόμοια περίπτωση μπορεί να αποτελεί η συγχώνευση δύο τραπεζών. Και στις δύο περιπτώσεις τα κίνητρα των δύο παικτών είναι πολύπλευρα.

Υπάρχουν ωστόσο και καταστάσεις, στις οποίες οι δύο παίκτες έχουν κοινά συμφέροντα, παρότι αυτά δεν είναι ορατά εκ πρώτης όψεως. Για δύο κράτη που βρίσκονται

σε εμπόλεμη κατάσταση, κοινό συμφέρον μπορεί να αποτελεί η κατάπαυση του πυρός, καθώς και η μη χρήση τοξικών αερίων και πυρηνικών όπλων.

Όπως λοιπόν εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς τα παίγνια μη-μηδενικού αθροίσματος παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση με την πραγματικότητα, και βρίσκουν ποικίλες εφαρμογές σε πολλές εκφάνσεις της καθημερινότητας. Χαρακτηριστικά πεδία εφαρμογών τους αποτελούν οι πολιτικές επιστήμες, η οικονομία, η φιλοσοφία και η βιολογία, καθώς και η πληροφορική. Η κατανόηση τους ωστόσο απαιτεί εις βάθος ανάλυση και δε συμπλέει με τους σκοπούς της εργασίας.

Στα πλαίσια λοιπόν του κεφαλαίου αυτού θα γίνει παρουσίαση χαρακτηριστικών παιγνίων, όπως το φημισμένο "Prisoner's Dilemma", το "Chicken game", κ.α., αλλά και παράθεση παραδειγμάτων από την καθημερινή ζωή. Στόχος είναι να αντιληφθεί ο αναγνώστης το πραγματικό νόημα των παιγνίων αυτών, που δεν είναι άλλο από την καθιέρωση ενός ορθολογικού τρόπου σκέψης και συμπεριφοράς κάθε φορά που βρίσκεται αντιμέτωπος με ανταγωνιστικές καταστάσεις, που απαιτούν λεπτό χειρισμό και προσομοιάζουν με παίγνια. Και στη σημερινή πραγματικότητα των συγκρούσεων και αντιπαραθέσεων, ευτυχώς ή δυστυχώς, καλούμαστε πολύ συχνά να παίξουμε το ρόλο του «παίκτη»!

2.5.2 Ορισμοί παιγνίων μη-μηδενικού αθροίσματος

Όπως προαναφέρθηκε, στα παίγνια μη-μηδενικού αθροίσματος, το όφελος του ενός παίκτη δεν ισοδυναμεί με τη ζημία του άλλου. Συνεπώς τα στοιχεία του πίνακα πληρωμών δεν είναι δυνατό να είναι ένας αριθμός, αλλά ένα ζεύγος αριθμών.

Η γενική μορφή πίνακα πληρωμών ενός παιγνίου δύο παικτών, μη-μηδενικού αθροίσματος είναι η εξής:

Πίνακας 2.13 Γενικός πίνακας πληρωμών παιγνίου δύο παικτών μη-μηδενικού αθροίσματος

		ΠΑΙΚΤΗΣ Β	
		B_1	B_2
ΠΑΙΚΤΗΣ Α	A_1	(a_1,b_1)	(a_2,b_2)
	A_2	(a_3,b_3)	(a_4,b_4)

Το επόμενο βήμα είναι να προσδιοριστούν κάποια γενικά κριτήρια λήψης απόφασης. Για παράδειγμα, στα παίγνια μηδενικού αθροίσματος ο παίκτης Α στόχευε στη μεγιστοποίηση του κέρδους του, και ο παίκτης Β στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του, καθότι το όφελος του ενός ήταν η ζημία του άλλου. Στην περίπτωση μας όμως τα οφέλη των δύο παικτών είναι ανεξάρτητα και συνεπώς και οι δύο παίκτες λαμβάνουν τις αποφάσεις τους με γνώμονα το ατομικό τους όφελος.

Η παραπάνω διαπίστωση περιγράφεται από ***τον κανόνα της ορθολογικότητας (principle of rationality)***, που υπαγορεύει το εξής: «***κάθε παίκτης αποσκοπεί στο μέγιστο δυνατό ίδιο όφελος».***

Με απλά λόγια, ο κάθε παίκτης αποφασίζει για τη στρατηγική που θα ακολουθήσει, αδιαφορώντας για το όφελος ή τη ζημία του αντιπάλου του. Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε ότι ο παίκτης Α συμμετέχει σε ένα παίγνιο απέναντι σε έναν οποιοδήποτε αντίπαλο, με πίνακα πληρωμών

ΠΑΙΚΤΗΣ Α		
A_1	a_1	a_2
A_2	a_3	a_4

Και αντίστοιχα ο πίνακας πληρωμών για τον παίκτη Β διαμορφώνεται ως εξής:

ΠΑΙΚΤΗΣ Β		
B_1	b_1	b_2
B_2	b_3	b_4

Στόχος και των δύο παικτών είναι η μεγιστοποίηση του ατομικού τους οφέλους, συνεπώς και οι δύο θα ακολουθήσουν maximin στρατηγικές. Το ζεύγος τιμών που θα προκύψει από τις maximin στρατηγικές των δύο παικτών, ονομάζεται **αμιγές ζεύγος τιμών του παιγνίου**. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται εύκολα οι maximin στρατηγικές και τα αμιγή ζεύγη τιμών κάθε μη-μηδενικού παιγνίου. Ας αναφερθεί όμως και ένα αριθμητικό παράδειγμα που περιγράφει τα παραπάνω.

2.5.2.1 Βελτιστοποίηση κατά Paretto

Στα παίγνια μη-μηδενικού αθροίσματος υπάρχουν και συγκεκριμένες συνθήκες βελτιστοποίησης. Μία από αυτές είναι και η περίφημη βελτιστοποίηση Pareto, που φέρει την ονομασία της από τον διάσημο Ιταλό κοινωνιολόγο, οικονομολόγο και φιλόσοφο **Fritz Wilfried Pareto**, ο οποίος αποτέλεσε το θεμέλιο λίθο για την εξέλιξη του πεδίου της μικροοικονομίας.

Ορισμός 2.1

Σε κάθε παίγνιο μη-μηδενικού αθροίσματος, το ζεύγος τιμών (a,b) θεωρείται βέλτιστο του (a',b'), αν ισχύει μία από τις παρακάτω σχέσεις :

$a > a'$ και $b \geq b'$, ή, $a \geq a'$ και $b > b'$ (2.14)

Για παράδειγμα, το ζεύγος (3,2) είναι βέλτιστο κατά Pareto καθενός από τα ζεύγη (1,2), (3,1) και (2,2). Το ζεύγος όμως ενός παιγνίου θεωρείται βέλτιστο κατά Pareto αν στο παίγνιο δεν υπάρχει κανένα άλλο ζεύγος με μεγαλύτερο όφελος για κάποιον από τους δύο παίκτες.

Στο παίγνιο μη-μηδενικού αθροίσματος του παρακάτω πίνακα, και τα δύο ζεύγη τιμών (2,3) και (1,5) είναι βέλτιστα κατά Pareto, διότι κάθε ένα από αυτά είναι βέλτιστο ενός τουλάχιστον ακόμη ζεύγους (των (2,2) και (0,3) αντίστοιχα) σύμφωνα με τη σχέση (2.14).

(2,3)	(1,5)
(2,2)	(0,3)

Αντίθετα, στο παράδειγμα 2.7 το ζεύγος (3,5) αποτελεί και τη μοναδική βέλτιστη κατά Pareto τιμή του παιγνίου, καθώς επαληθεύει τη σχέση (2.14) στη σύγκριση με κάθε ένα από τα έτερα ζεύγη του πίνακα, (2,3), (2,2), (1,3).

2.5.2.2 Ισορροπία Nash

Στη θεωρία παιγνίων μία πολύ σημαντική παράμετρος επίλυσης ενός παιγνίου μη-μηδενικού αθροίσματος με δύο ή περισσότερους παίκτες, αποτελεί η ισορροπία του Nash, που φέρει την ονομασία της από το διάσημο μαθηματικό και οικονομολόγο **John Forbes Nash** ο οποίος μάλιστα τιμήθηκε το 1994 με το βραβείο Nobel για αυτή του την πρόταση.

Η ισορροπία του Nash είναι μία κατάσταση στην οποία κάθε παίκτης έχει πληροφόρηση για τις στρατηγικές του αντιπάλων του, κανένας όμως εκ των παικτών δεν

επωφελείται αν αλλάξει μόνο ο ίδιος στρατηγική. Αν λοιπόν όλοι οι παίκτες έχουν επιλέξει μία στρατηγική, και ενδεχόμενη αλλαγή στρατηγικής από έναν παίκτη-με ταυτόχρονη διατήρηση στρατηγικής από τους υπόλοιπους- δεν του αποφέρει όφελος , τότε το σύνολο των επιλεγμένων στρατηγικών και των αντίστοιχων τιμών συνιστούν μία ισορροπία Nash.

Με απλά λόγια, σε ένα παίγνιο μη-μηδενικού αθροίσματος δύο παικτών, ο παίκτης Α και ο παίκτης Β βρίσκονται σε ισορροπία Nash, αν ο παίκτης Α επιλέγει την καλύτερη στρατηγική που μπορεί, λαμβάνοντας υπόψη του την επιλογή του παίκτη Β, και αντίστοιχα ο παίκτης Β επιλέγει τη βέλτιστη στρατηγική του, αξιολογώντας την επιλογή του παίκτη Α. Ομοίως περισσότεροι παίκτες βρίσκονται σε ισορροπία Nash εάν καθένας από αυτούς λαμβάνει την καλύτερη απόφαση που μπορεί, γνωρίζοντας τις επιλογές των αντιπάλων του.

Ωστόσο μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι μία ισορροπία Nash δεν αποφέρει απαραίτητα τα μεγαλύτερα οφέλη σε όλους τους παίκτες που συμμετέχουν, κι αυτό διότι δεν είναι πάντα βέλτιστη κατά Pareto. Σε πολλές περιπτώσεις, όλοι οι παίκτες μπορούν να αυξήσουν τα κέρδη τους αν καταφέρουν να συμφωνήσουν σε ένα σύνολο στρατηγικών, διαφορετικών από την ισορροπία Nash. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα λεγόμενα «καρτέλ», δηλαδή οι συμφωνίες ανάμεσα σε μεγάλους παίκτες της αγοράς για τον προσδιορισμό των τιμών καταναλωτικών αγαθών και υπηρεσιών, που οδηγεί σε μεγιστοποίηση των κερδών των παικτών.

Μετά τη λεκτική περιγραφή της ισορροπίας Nash, μπορούμε πλέον να δώσουμε και το μαθηματικό ορισμό της.

Ορισμός 2.2

Μία ισορροπία Nash ενός παιγνίου στρατηγικής $G = \{S_1, ..., S_n, u_1, ..., u_n\}$ *είναι ένας ορίζοντας στρατηγικής* $\{s_1^*, s_2^*, ..., s_n^*\}$ *τέτοιος ώστε για κάθε παίκτη i να ισχύει:*

$$u_1\{s_1^*, ..., s_{i-1}^*, s_i^*, s_{i+1}^*..., s_n^*\} \geq u_i\{s_1^*, ..., s_{i-1}^*, s\ , s_{i+1}^*..., s_n^*\} \qquad (2.15)$$

για κάθε $s \in S_i$.

Με $S_1, S_2, .., S_n$ συμβολίζεται το σύνολο των στρατηγικών των n παικτών ενώ u_i είναι η συνάρτηση απόδοσης του παίκτη i που είναι μία πραγματική συνάρτηση n μεταβλητών $u_i : S_1 \times S_2 \times ... \times S_n \to R$. Το καρτεσιανό γινόμενο $S_1 \times S_2 \times ... \times S_n$ είναι το σύνολο οριζόντων στρατηγικής του παιγνίου και τα στοιχεία του $(s_1, s_2, ..., s_n)$ ονομάζονται ορίζοντες στρατηγικής.

Ο παραπάνω ορισμός στην ουσία απεικονίζει με μαθηματικό τρόπο όλα όσα λεκτικά περιγράφηκαν για την ισορροπία Nash. Η επιλογή δηλαδή από τον παίκτη i οποιασδήποτε άλλης στρατηγικής πλην της s_i^*, με ταυτόχρονη διατήρηση των στρατηγικών της ισορροπίας Nash από τους υπόλοιπους παίκτες, του προσφέρει απόδοση μικρότερη ή ίση από αυτήν της ισορροπίας.

Όταν στη σχέση (2.15) ισχύει μόνο η ανισότητα, τότε μιλάμε για **ισχυρή ισορροπία Nash**, ενώ όταν ισχύει και η ισότητα πρόκειται για **ασθενή ισορροπία Nash.** Αυτό που επίσης πρέπει να σημειωθεί είναι ότι ένα παίγνιο μπορεί να έχει ισορροπία Nash με χρήση είτε αμιγών είτε μικτών στρατηγικών.

Μάλιστα ο Nash απέδειξε ότι κάθε παίγνιο n παικτών έχει μία τουλάχιστον ισορροπία Nash εάν επιτρέπεται η χρήση μικτών στρατηγικών από τους παίκτες που συμμετέχουν σε αυτό.

Ας δούμε όμως και την πρακτική σημασία της ισορροπίας Nash, με την παράθεση ορισμένων χαρακτηριστικών παραδειγμάτων.

Α. Ανταγωνιστικό παίγνιο

Ένα χαρακτηριστικό παίγνιο ανταγωνισμού μη-μηδενικού αθροίσματος είναι το εξής. Δύο παίκτες επιλέγουν ταυτόχρονα έναν ακέραιο αριθμό από το 0 εώς το 3 και κερδίζουν ποσό ίσο με το μικρότερο αριθμό του ζεύγους. Ωστόσο ο παίκτης που επιλέγει το μεγαλύτερο αριθμό του ζεύγους χάνει δύο ευρώ, τα οποία κερδίζει ο αντίπαλος. Ο πίνακας πληρωμών του παιγνίου είναι ο παρακάτω

Πίνακας 2.14 Γενικός πίνακας πληρωμών ενός ανταγωνιστικού παιγνίου

	Ο παίκτης Β επιλέγει '0'	**Ο παίκτης Β επιλέγει '1'**	**Ο παίκτης Β επιλέγει '2'**	**Ο παίκτης Β επιλέγει '3'**
Ο παίκτης Α επιλέγει '0'	*0, 0*	*2, -2*	*2, -2*	*2, -2*
Ο παίκτης Α επιλέγει '1'	*-2, 2*	*1, 1*	*3, -1*	*3, -1*
Ο παίκτης Α επιλέγει '2'	*-2, 2*	*-1, 3*	*2, 2*	*4, 0*
Ο παίκτης Α επιλέγει '3'	*-2, 2*	*-1, 3*	*0, 4*	*3, 3*

Το παίγνιο αυτό έχει μία και μοναδική ισορροπία Nash αμιγούς στρατηγικής, που είναι η επιλογή του 0 και από τους δύο παίκτες, και το ζεύγος ισορροπίας (0,0) απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Οποιαδήποτε άλλη επιλογή στρατηγικών από τους δύο παίκτες επιδέχεται

βελτιώσεως αν ο ένας από τους δύο αντιπάλους επιλέξει ένα μικρότερο ακέραιο αριθμό από τον αντίπαλό του.

Για παράδειγμα ας υποτεθεί ότι οι δύο παίκτες έχουν αρχικά επιλέξει και οι δύο τον αριθμό '2'. Είναι φανερό ότι ο παίκτης Α θα θελήσει να διαφοροποιήσει τη στρατηγική του επιλέγοντας τον αριθμό '1'(κυανό κελί), και αντίστοιχα, ο παίκτης Β λογικότατα θα θελήσει και αυτός να επιλέξει τον αριθμό '1' (μοβ κελί) προκειμένου να αυξήσει το κέρδος του. Συνεπώς το ζεύγος (2,2), που απεικονίζεται με πράσινο χρώμα στον πίνακα πληρωμών, δεν αποτελεί ζεύγος ισορροπίας Nash καθώς και οι δύο παίκτες αποκομίζουν οφέλη διαφοροποιώντας τις στρατηγικές τους.

Ας υποτεθεί τώρα ότι το παίγνιο διαφοροποιούταν λίγο ώστε οι δύο παίκτες να κερδίζουν ποσό ίσο με τον κοινό αριθμό επιλογής, και σε διαφορετική περίπτωση τίποτα. Τότε θα παρουσιάζονταν τέσσερις ισορροπίες Nash {(0,0),(1,1),(2,2),(3,3)} εκ των οποίων οι τρεις είναι ισχυρές και μία ασθενής.

Β. Παίγνιο συνεργασίας

Το παίγνιο συνεργασίας αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παίγνιο δύο παικτών, όπου ο κάθε παίκτης έχει δύο επιλογές . Ο πίνακας πληρωμών του παιγνίου είναι ο παρακάτω και για τις ανταμοιβές ισχύουν οι σχέσεις A>C και D>B. Είναι λοιπόν φανερό ότι για να αποκομίσουν μεγαλύτερο όφελος οι δύο παίκτες πρέπει να συνεργαστούν.

Πίνακας 2.15 Γενικός πίνακας πληρωμών ενός παιγνίου συνεργασίας

	Ο παίκτης Β επιλέγει τη στρατηγική 1	**Ο παίκτης Β επιλέγει τη στρατηγική 2**
Ο παίκτης Α επιλέγει τη στρατηγική 1	*(A, A)*	*(B, C)*
Ο παίκτης Α επιλέγει τη στρατηγική 2	*(C, B)*	*(D, D)*

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν δύο εταιρίες λογισμικού, οι οποίες πρέπει να επιλέξουν μεταξύ δύο τεχνολογιών για την παραγωγή του αντίστοιχου hardware. Αν αποφασίσουν να επιλέξουν δύο διαφορετικές τεχνολογίες και συνεπώς διαφορετικά προϊόντα , το καταναλωτικό κοινό θα βρεθεί σε σύγχυση και οι πωλήσεις θα είναι μικρότερες. Αν

επιλέξουν κοινή τεχνολογία, θα υπάρξουν περισσότερες πωλήσεις και μεγαλύτερα κέρδη. Συνεπώς τα δύο ζεύγη ισορροπιών Nash του παιγνίου είναι τα (A,A) και (D,D).

Γ. Ισορροπία Nash σε πίνακα πληρωμών

Στη συνέχεια θα αναφερθεί μία υπολογιστική μέθοδος εύρεσης της ισορροπίας Nash, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε παίγνια δύο παικτών, όπου οι παίκτες έχουν περισσότερες από δύο επιλογές. Η μέθοδος αυτή δεν εφαρμόζεται για την περίπτωση χρήσης μικτών στρατηγικών από τους δύο παίκτες.

Σε ένα παίγνιο μη-μηδενικού αθροίσματος, ένα ζεύγος τιμών (a_i, b_j), τέτοιο ώστε το a_i να είναι το μέγιστο στοιχείο της στήλης του, και το b_j το μέγιστο στοιχείο της σειράς του, είναι ένα ζεύγος ισορροπίας Nash.

Ας εφαρμόσουμε όμως τη μέθοδο στον παρακάτω πίνακα πληρωμών.

Πίνακας 2.16 Πίνακας πληρωμών με ισορροπία Nash

	Στρατηγική Α	**Στρατηγική Β**	**Στρατηγική Γ**
Στρατηγική Α	0, 0	**25, 40**	5, 10
Στρατηγική Β	**40, 25**	0, 0	5, 15
Στρατηγική Γ	10, 5	15, 5	**10, 10**

Εφαρμόζοντας την προαναφερθείσα μέθοδο εύκολα εντοπίζονται τα ζεύγη ισορροπίας Nash, τα οποία και σημειώνονται στον πίνακα με έντονη γραφή. Για παράδειγμα για το ζεύγος (40,25), είναι φανερό ότι το 40 αποτελεί το μέγιστο της $1^{ης}$στήλης και το 25 το μέγιστο της $2^{ης}$ γραμμής. Για όλα τα υπόλοιπα ζεύγη τιμών είτε το πρώτο είτε το δεύτερο μέλος δεν είναι μέγιστα στη στήλη τους και τη σειρά τους αντίστοιχα.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να εντοπίζουμε όλα τα ζεύγη ισορροπίας Nash, σαρώνοντας τις γραμμές και τις στήλες του πίνακα πληρωμών και εντοπίζοντας τα μέγιστα. Αξιοσημείωτο είναι ότι ένας nxn πίνακας πληρωμών είναι δυνατό να έχει από 0 έως n ισορροπίες Nash.

2.5.3. Χαρακτηριστικά παίγνια μη μηδενικού αθροίσματος

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν ορισμένα χαρακτηριστικά παίγνια μη μηδενικού αθροίσματος που δε θα ήταν υπερβολή να πούμε πως καθιέρωσαν ευρύτατα τη Θεωρία Παιγνίων και προσέφεραν πάμπολλες εφαρμογές σε προβλήματα τόσο των επιστημών όσο και της καθημερινότητας.

Στη συνέχεια λοιπόν θα περιγραφούν το πασίγνωστο παίγνιο "Prisoners Dilemma", το «κινηματογραφικό» παίγνιο "Chicken game", το διαχρονικό "Battle of the sexes" και ορισμένα άλλα. Παράλληλα θα παρατεθούν και εφαρμογές των παραπάνω παιγνίων που θα καταδείξουν την πρακτική χρησιμότητά τους.

2.5.3.1 Το παίγνιο "Prisoner's Dilemma"

Το «Δίλλημα του φυλακισμένου» είναι με βεβαιότητα το πιο ευρέως αναλυμένο παίγνιο της θεωρίας παιγνίων. Αρχικοί δημιουργοί του υπήρξαν οι **Merrill Flood** και **Melvin Dresher** το έτος 1950, όταν και εργάζονταν για τη **RAND** (**R**esearch **AN**d **D**evelopment) μία επιστημονική, μη κερδοσκοπική οργάνωση που αρχικά προσέφερε τις υπηρεσίες της στις ένοπλες δυνάμεις των Η.Π.Α. Στη συνέχεια ο Albert W. Tucker μορφοποίησε το πρόβλημα χρησιμοποιώντας πίνακες πληρωμών και του προσέδωσε την τελική του μορφή, αποδίδοντάς του παράλληλα και την ονομασία "Prisoner's Dillema" (PD) το έτος 1992.

2.5.3.1.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου

Στην κλασσική του μορφή το Δίλημμα του Φυλακισμένου περιγράφεται ως εξής.

Παράδειγμα 2.7 (Το Δίλλημα του Φυλακισμένου)

Δύο ύποπτοι έχουν συλληφθεί από την αστυνομία. Ωστόσο τα στοιχεία που υπάρχουν είναι ανεπαρκή για την εξιχνίαση της υπόθεσης και έτσι οι αστυνομικοί κάνουν στους δύο κρατούμενους – οι οποίοι κρατούνται σε διαφορετικούς χώρους- την ίδια πρόταση. Σκοπός είναι ένας τουλάχιστον εκ των δύο να καταθέσει κατά του άλλου στην αίθουσα του δικαστηρίου. Στην περίπτωση που ο ένας καταθέσει και ο άλλος σιωπήσει, τότε ο πρώτος δε φυλακίζεται ενώ ο δεύτερος καταδικάζεται σε ποινή φυλάκισης δέκα ετών. Στην περίπτωση που καταθέσουν και οι δύο, τότε ο καθένας καταδικάζεται σε ποινή φυλάκισης πέντε ετών. Αν κανένας από τους δύο δεν καταθέσει, τότε και οι δύο τιμωρούνται με φυλάκιση ενός έτους λόγω ελλιπών στοιχείων.

Ποια στρατηγική πρέπει να ακολουθήσου οι δύο κρατούμενοι;

Λύση

Ο πίνακας πληρωμών του παιγνίου είναι ο παρακάτω.

Πίνακας 2.17 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου "Prisoner's Dilemma"

		ΠΑΙΚΤΗΣ Β	
		Ο κρατούμενος Β παραμένει σιωπηλός	Ο κρατούμενος Β καταθέτει
ΠΑΙΚΤΗΣ Α	Ο κρατούμενος Α παραμένει σιωπηλός	(-1,-1)	(-10,0)
	Ο κρατούμενος Α καταθέτει	(0,-10)	(-5,-5)

Από μία πρώτη ανάγνωση του πίνακα γίνονται άμεσα ορατά δύο δεδομένα. Το πρώτο είναι ότι και οι δύο παίκτες έχουν συμφέρον να σιωπήσουν αφού και οι δύο τιμωρούνται με ποινή φυλάκισης μόνο ενός έτους. Και το δεύτερο ότι αν ένας παίκτης σιωπήσει, ο άλλος έχει κίνητρο να ομολογήσει.

Μία λεπτομερέστερη εξέταση του παιγνίου δείχνει ότι ανεξάρτητα από την επιλογή του αντιπάλου, κάθε παίκτης λαμβάνει υψηλότερη απόδοση (μικρότερη ποινή φυλάκισης) αν καταθέσει. Με άλλα λόγια η στρατηγική της κατάθεσης είναι κυρίαρχη για καθέναν από τους δύο παίκτες.

Με δεδομένο ότι δεν υπάρχει οποιαδήποτε επικοινωνία ή δυνατότητα συνεννόησης μεταξύ των δύο παικτών, κάθε λογικός παίκτης αναμένεται να παίξει με την αυστηρά κυρίαρχη στρατηγική του. Το ίδιο όμως θα πράξει και ο αντίπαλός του και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την καταδίκη των δύο παικτών σε πενταετή φυλάκιση αντί της μονοετούς που θα πετύχαιναν αν παρέμεναν και οι δύο σιωπηλοί. Αυτή είναι και η μοναδική ισορροπία Nash του παιγνίου, και το ζεύγος (-5,-5) αποτελεί το ζεύγος ισορροπίας Nash.

Το ορθολογικό λοιπόν κριτήριο της μικρότερης δυνατής ατομικής καταδίκης οδηγεί σε χειρότερο αποτέλεσμα από ότι θα οδηγούσε το κριτήριο της μείωσης της ποινής του συνενόχου με αντίτιμο μία μικρή ποινή φυλάκισης και για τον ίδιο τον παίκτη. Γίνεται λοιπόν φανερό αυτό που είχε τονιστεί και σε προηγούμενη ενότητα, ότι δηλαδή ένα ζεύγος ισορροπίας Nash δεν είναι απαραίτητα και βέλτιστο κατά Pareto. Πράγματι το ζεύγος ισορροπίας Nash είναι το (-5,-5) ενώ το βέλτιστο ζεύγος κατά Pareto το (-1,-1).

Συνεπώς η μόνη ισορροπία Nash του PD προκύπτει από τη μη συνεργασία των δύο πλευρών. Η κατάσταση διαφοροποιείται ωστόσο όταν το παίγνιο επαναλαμβάνεται πολλές φορές. Κι αυτό γιατί πέρα από την καθαρή ανταμοιβή υπεισέρχεται και το αίσθημα της εκδίκησης για πιθανή προηγούμενη μη συνεργασία. Αν ο αριθμός των επαναλήψεων είναι εκ των προτέρων γνωστός τότε η οικονομική θεωρία αποδεικνύει ότι οι δύο παίκτες θα επιλέξουν και πάλι την τακτική της μη συνεργασίας, ανεξάρτητα από τον αριθμό των επαναλήψεων.

Μόνο όταν ο αριθμός των επαναλήψεων είναι άγνωστος και απροσδιόριστος είναι δυνατό να υπάρξει ισορροπία με χρήση τακτικής συνεργασίας από τους δύο παίκτες. Μάλιστα διαπιστώθηκε πως όταν το παίγνιο επαναλαμβάνεται άπειρες φορές διαμορφώνεται μία ισορροπία Nash με συνεργασία των δύο πλευρών, εξακολουθούν όμως να υπάρχουν και άλλες ισορροπίες που προκύπτουν από τη μη συνεργασία τους.

2.5.3.1.2 Χαρακτηριστικές εφαρμογές του PD

Το PD αποτέλεσε θεμέλιο λίθο για την εξέλιξη της Θεωρίας Παιγνίων και οι εφαρμογές του είναι ποικίλες και σημαντικές σε πολλούς χώρους της καθημερινότητάς μας. Ενδεικτικά θα αναφερθούν στη συνέχεια ορισμένες μόνο χαρακτηριστικές εφαρμογές του.

Α. Στις πολιτικές επιστήμες

Στις πολιτικές επιστήμες το Δίλλημα του Φυλακισμένου αντικατοπτρίζει απόλυτα το πρόβλημα δύο κρατών με εχθρικές σχέσεις (Η.Π.Α-Ε.Σ.Σ.Δ., Ελλάς-Τουρκία) που επιδίδονται σε ένα συνεχή ανταγωνισμό για τη βελτίωση της «πολεμικής μηχανής» τους. Οι επιλογές που έχουν είναι δύο. Είτε να αυξάνουν συνεχώς τον προϋπολογισμό του εξοπλισμού τους, εις βάρος άλλων αναγκών του λαού τους, ή να συμφωνήσουν σε αμφότερη μείωση του εξοπλισμού τους. Κανένα όμως από τα δύο κράτη δε μπορεί να είναι βέβαιο ότι η ετέρα πλευρά θα τηρήσει τη συμφωνία, και λειτουργώντας απόλυτα ορθολογικά θα αποφασίσει να αυξήσει τις δαπάνες εξοπλισμού του.

Το παράδοξο ωστόσο στην όλη υπόθεση είναι πώς η ορθολογική επιλογή από τους δύο παίκτες οδηγεί σε ένα τόσο παράλογο αποτέλεσμα, όπως είναι η επένδυση σε όπλα αντί σε άλλα αγαθά; Αυτό όπως προαναφέρθηκε οφείλεται στο γεγονός ότι πολύ συχνά μία ισορροπία δεν είναι και βέλτιστη κατά Paretto.

Β. Στις κοινωνικές επιστήμες

Όλες οι περιβαλλοντικές μελέτες που πραγματοποιούνται τα τελευταία χρόνια διαπιστώνουν τη διόγκωση του πολύ γνωστού σε όλους μας «φαινόμενου του θερμοκηπίου» που σχετίζεται με την εκπομπή CO_2 κυρίως από τις βιομηχανίες των ανεπτυγμένων κρατών. Η κατάσταση αυτή μπορεί να παρουσιαστεί ως μία μορφή του PD.

Όλα τα κράτη μπορούν να επωφεληθούν από μία εξομάλυνση των κλιματολογικών και περιβαλλοντικών αλλαγών, ωστόσο κάθε κράτος είναι διστακτικό σε μία πιθανή μείωση των δικών του εκπομπών CO_2. Συμπερασματικά, κάθε κράτος επιθυμεί τη μείωση των εκπομπών από όλα τα κράτη-συμπεριλαμβανομένου και του ιδίου- συγκριτικά με τη συνέχιση της υπάρχουσας κατάστασης που οδηγεί σε περιβαλλοντική καταστροφή. Ακόμη καλύτερο ωστόσο για τα ίδια συμφέροντα του κάθε κράτους είναι η μείωση των εκπομπών από όλα τα υπόλοιπα κράτη, εκτός του ιδίου.

Γ. Στον αθλητισμό

Το PD βρίσκει εφαρμογή στο δίλλημα της χρήσης, ή μη, αναβολικών ουσιών στον αθλητισμό. Δεδομένου ότι τα αναβολικά έχουν περίπου την ίδια επίδραση σε κάθε αθλητή, είναι προς όφελος όλων των αθλητών να αποφεύγουν τη χρήση τους λόγω των παρενεργειών που προκαλούν. Αν ωστόσο, έστω και ένας αθλητής επιλέξει να κάνει χρήση ουσιών, τότε αυτός αποκτά πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων, εκτός αν και εκείνοι πράξουν το ίδιο.

Σε πλήρη αντιστοίχιση συνεπώς με το PD όπου η κυρίαρχη στρατηγική είναι η στρατηγική της ομολογίας, στην προκειμένη περίπτωση κυρίαρχη μοιάζει να είναι η επιλογή της χρήσης των ουσιών. Όταν τα οφέλη του κάθε παίκτη, και αντίστοιχα ο πίνακας πληρωμών του παιγνίου, καθορίζονται από την ψυχρή λογική των αριθμών, των ρεκόρ και των κερδών, η ορθολογική επιλογή που προκύπτει και από το PD είναι η χρήση των αναβολικών. Και όπως δυστυχώς προκύπτει από την υπάρχουσα κατάσταση, οι αριθμοί σπάνια λαθεύουν.

Δ. Στις Οικονομικές επιστήμες

Την πλέον ίσως χαρακτηριστική εφαρμογή του PD αποτελεί ο χώρος των διαφημίσεων και ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα αυτού είναι ο ανταγωνισμός μεταξύ των αμερικανικών καπνοβιομηχανιών στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν η διαφήμιση των τσιγάρων επιτρεπόταν ακόμη από την αμερικανική κυβέρνηση.

Δύο πολύ γνωστές εταιρίες που είχαν εμπλακεί την περίοδο εκείνη σε ένα διαρκή ανταγωνισμό ήταν η Reynolds και η Philip Morris. Η αποτελεσματικότητα της διαφημιστικής καμπάνιας της Reynolds καθοριζόταν σε μεγάλο βαθμό από το ποσό που επένδυε και η Philip

Morris για να διαφημιστεί. Αντίστοιχα, τα προσδοκώμενα οφέλη της Philip Morris από τις διαφημίσεις της, επηρεάζονταν από το διαφημιστικό πρόγραμμα της Reynolds.

Για μια μεγάλη χρονική περίοδο και οι δύο εταιρίες επένδυαν υψηλά ποσά στα διαφημιστικά τους πακέτα, και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα οι πωλήσεις τους και συνεπώς τα έσοδά τους να παραμένουν σταθερά, τα έξοδά τους να αυξάνονται λόγω των αυξημένων διαφημιστικών τους δαπανών και τελικά το καθαρό τους κέρδος να συρρικνώνεται.

Συνεπώς η μείωση των διαφημίσεων θα ήταν προς όφελος και των δύο. Αν ωστόσο η μία από τις δύο εταιρίες αποφάσιζε να μη διαφημίσει το προϊόν της και η άλλη το διαφήμιζε, τότε η δεύτερη θα αύξανε κατά πολύ τα κέρδη της.

Ο κανόνας σε τέτοιες περιπτώσεις είναι γνωστός και υπαγορεύει το εξής:

"Αν στο παίγνιο υπάρχει μία κυρίαρχη στρατηγική πρέπει να την επιλέγεις και επιπλέον να αναμένεις από τον αντίπαλό σου να πράξει το ίδιο."

Πράγματι ο κανόνας αυτός επαληθεύτηκε και από τις παραπάνω δύο εταιρίες και τις οδήγησε σε σημαντική μείωση των κερδών τους. Όταν λοιπόν το 1964 το Αμερικάνικο Υπουργείο Υγείας υποχρέωσε τις εταιρίες να επικολλούν στις συσκευασίες των προϊόντων τους το προειδοποιητικό σήμα «το κάπνισμα βλάπτει σοβαρά την υγεία», εκείνες μάλλον με ευχαρίστηση το υποδέχθηκαν, και όλες άρχισαν να περικόπτουν τις διαφημιστικές τους δαπάνες.

Έτσι, όταν τελικά το 1970 η αμερικάνικη κυβέρνηση πρότεινε απαγόρευση των διαφημίσεων για τα τσιγάρα, οι καπνοβιομηχανίες αμέσως συναίνεσαν, υπό το φόβο και των αποζημιώσεων προς καταναλωτές με κλονισμένη υγεία, οι οποίοι είχαν ασκήσει αγωγές στα πολιτικά δικαστήρια και διεκδικούσαν υψηλές αποζημιώσεις. Η απαγόρευση τελικά των διαφημίσεων οδήγησε σε μείωση των διαφημιστικών δαπανών κατά 63 εκατομμύρια δολάρια και αύξηση των κερδών των καπνοβιομηχανιών κατά 91 εκατομμύρια δολάρια.

Σε ορισμένες λοιπόν περιπτώσεις η συνεργασία μεταξύ των παικτών δεν αποτελεί απλώς τη βέλτιστη λύση αλλά αποτελεί και αναγκαιότητα. Ειδικά στο χώρο της βιομηχανίας η διαμόρφωση των λεγόμενων καρτέλ αποδείχθηκε ως η μόνη λύση όχι απλώς για την κερδοφορία, αλλά για την επιβίωση των εταιριών του κλάδου.

Ε. Στις νομικές επιστήμες

Το θεωρητικό συμπέρασμα του PD σχετικά με την κυρίαρχη στρατηγική των δύο παικτών είναι ο κύριος λόγος που σε πολλά κράτη δεν προτείνεται συμβιβασμός στους κατηγορούμενους.

Πολλές φορές είναι προς όφελος και των δύο κατηγορούμενων να συμβιβαστούν και να καταθέσουν, ακόμη και αν είναι και οι δύο αθώοι. Μάλιστα το χειρότερο σενάριο είναι η περίπτωση όπου ο ένας μόνο από τους δύο είναι ένοχος. Τότε, ο αθώος είναι απρόθυμος να συμβιβαστεί, ενώ ο ένοχος λογικά δέχεται το συμβιβασμό και καταθέτει εναντίον του αθώου, ο οποίος και καταδικάζεται.

ΣΤ. Στα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης

Μία χαρακτηριστική περίπτωση όπου εφαρμόστηκε το PD είναι στο τηλεοπτικό παιχνίδι "Big Brother", όπου το δίλημμα ετέθη στις δύο συγκατοίκους, τη Lisa Appleton και Sara Folino. Το χρηματικό έπαθλο ήταν £50,000. Αν οι δύο συγκάτοικοι συμφωνούσαν να μοιραστούν το ποσό, καθεμία θα λάμβανε £25,000. Αν η μία αποδεχόταν τη μοιρασιά ενώ η άλλη όχι, τότε η δεύτερη θα κέρδιζε ολόκληρο το έπαθλο και η πρώτη τίποτα. Αν καμία από τις δύο δεν αποδεχόταν τη μοιρασιά, τότε το κέρδος και των δύο θα ήταν μηδενικό.

Στις δύο συγκατοίκους δόθηκε ένα λεπτό για να αποφασίσουν ποια στρατηγική θα ακολουθήσουν. Και οι δύο συμφώνησαν να δηλώσουν πως θα μοιραστούν το ποσό. Μέχρι τη στιγμή όμως της ανακοίνωσης στο δωμάτιο του "Big Brother" κάποια από τις δύο, ή και οι δύο, θα μπορούσε να αλλάξει την απόφασή της. Τελικά και οι δύο τήρησαν το λόγο τους, επιλέγοντας τη στρατηγική της συνεργασίας και κερδίζοντας £25,000 έκαστη.

2.5.3.2 Το παίγνιο "Stag hunt"

2.5.3.2.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου

Στη θεωρία παιγνίων, το παίγνιο "Stag hunt" περιγράφει το δίλημμα του παίκτη μεταξύ προσωπικής ασφάλειας και αμοιβαίας συνεργασίας. Συχνά επίσης αναφέρεται και ως "παίγνιο ασφαλείας"("assurance game"), "παίγνιο συνεργασίας" ("coordination game"), και, " δίλημμα εμπιστοσύνης" ("trust dilemma"). Εμπνευστής του παιγνίου υπήρξε ο Γάλλος φιλόσοφος Jean Jacques Rousseau.

Παράδειγμα 2.8

Δύο κυνηγοί αποφασίζουν να κυνηγήσουν στη δασική περιοχή της Αλσατίας. Η πανίδα της περιοχής αποτελείται, μεταξύ άλλων, από λαγούς και ελάφια, που κατέχουν περίοπτη θέση

στη λίστα των δύο κυνηγών. Για το κυνήγι του ελαφιού απαιτείται συνεργασία, ενώ για του λαγού όχι. Κάθε κυνηγός καλείται να επιλέξει αν θα κυνηγήσει ένα ελάφι ή ένα λαγό, και επιπλέον πρέπει να λάβει την απόφασή του χωρίς να έχει την παραμικρή πληροφόρηση για τις προθέσεις του άλλου. Ποια στρατηγική πρέπει να ακολουθήσουν οι δύο κυνηγοί;

Λύση

Για να μπορέσει να στεφθεί με επιτυχία το κυνήγι ενός ελαφιού απαιτείται η συνεργασία και των δύο πλευρών. Ο λαγός αντίθετα αποτελεί ένα εύκολο στόχο για ατομικό κυνήγι, ωστόσο η αξία του ως θήραμα είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή του ελαφιού. Το ελάφι λοιπόν αποτελεί ένα σαφώς πιο ωφέλιμο στόχο, προϋποθέτει όμως την ύπαρξη αμοιβαίας εμπιστοσύνης μεταξύ των εμπλεκόμενων μελών.

Από μαθηματικής απόψεως το παίγνιο περιγράφεται στη γενική του μορφή με τον πίνακα πληρωμών 2.18, όπου για τις μεταβλητές ισχύουν οι σχέσεις (2.16) και (2.17).

$$A > B \geq D > C \tag{2.16}$$

$$a > c \geq d > b \tag{2.17}$$

Πίνακας 2.18 Γενικός πίνακας πληρωμών του παιγνίου “Stag hunt”

		ΠΑΙΚΤΗΣ Β	
		ΕΛΑΦΙ	ΛΑΓΟΣ
ΠΑΙΚΤΗΣ Α	ΕΛΑΦΙ	(A,a)	(C,c)
	ΛΑΓΟΣ	(B,b)	(D,d)

Για να μπορέσουμε ωστόσο να μελετήσουμε καλύτερα το παίγνιο, παραθέτουμε και το αριθμητικό παράδειγμα του πίνακα 2.19

Πίνακας 2.19 Αριθμητικό παράδειγμα του παιγνίου “Stag hunt”

		ΠΑΙΚΤΗΣ Β	
		ΕΛΑΦΙ	ΛΑΓΟΣ
ΠΑΙΚΤΗΣ Α	ΕΛΑΦΙ	(4,4)*	(1,3)
	ΛΑΓΟΣ	(3,1)	(3,3)*

Παρατηρώντας τον πίνακα 2.19, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι το παίγνιο παρουσιάζει δύο αμιγείς ισορροπίες Nash, οι οποίες είναι αμφότερες βέλτιστες κατά Paretto. Η πρώτη

είναι η στρατηγική της συνεργασίας των δύο πλευρών (κυνήγι ελαφιού) και η δεύτερη η στρατηγική της ατομικής θήρας (κυνήγι λαγού).

Είναι φανερό ότι η ισορροπία Nash (4,4)* εξασφαλίζει στους παίκτες μεγαλύτερα κέρδη, περιέχει όμως το ρίσκο της συνεργασίας, ή μη, της ετέρας πλευράς. Αντίθετα, η ισορροπία (3,3)* εξασφαλίζει μικρότερα κέρδη, παρέχει όμως μεγαλύτερη ασφάλεια στον παίκτη.

Αυτή είναι και η βασική του διαφορά σε σχέση με το PD, όπου η στρατηγική της μη συνεργασίας συνιστά ισορροπία Nash, όμως η στρατηγική της συνεργασίας αποφέρει μεγαλύτερα οφέλη στους δύο παίκτες και είναι βέλτιστη κατά Paretto.

Ας προσπαθήσουμε όμως να διεισδύσουμε περισσότερο στη λογική του παιγνίου, ανιχνεύοντας τα κίνητρα που μπορούν να οδηγήσουν τον παίκτη στη μία ή την άλλη ισορροπία Nash. Το τι είναι λογικό να πράξει κάθε παίκτης καθορίζεται από την εκτίμησή του σχετικά με την επιλογή του άλλου.

Είναι φανερό πως είναι προτιμότερο το κυνήγι του ελαφιού όταν και ο έτερος παίκτης πρόκειται να πράξει το ίδιο. Ο κυνηγός λοιπόν που επιλέγει το ελάφι ως θήραμα λαμβάνει το ρίσκο της συνεργασίας ή μη του άλλου κυνηγού. Αντίθετα εκείνος που προτιμά το κυνήγι του λαγού δεν αναλαμβάνει τέτοιο ρίσκο, καθώς δε χρειάζεται υποστήριξη για την επίτευξη του στόχου του, παραιτείται όμως από τη πιθανή διεκδίκηση ενός μεγαλύτερου κέρδους. Έτσι λοιπόν ένας ορθολογικός παίκτης αμφιταλαντεύεται μεταξύ του κοινού οφέλους και του προσωπικού ρίσκου.

Από τον πίνακα πληρωμών 2.19 παρατηρούμε ότι το κυνήγι του λαγού έχει ένα προσδοκώμενο όφελος 3, ανεξάρτητα από την επιλογή του άλλου παίκτη. Το προσδοκώμενο κέρδος στην περίπτωση της συνεργασίας για το κυνήγι του ελαφιού είναι 4, ενώ στην περίπτωση του ατομικού κυνηγιού γίνεται μόλις 1.

Είναι δεδομένο ότι ένας πεσιμιστής παίκτης, που αναμένει πάντα το χειρότερο, θα προτιμήσει το κυνήγι του λαγού. Αναμενόμενο ωστόσο είναι πως ένας προσεκτικός παίκτης, ο οποίος διατηρεί και τις επιφυλάξεις του για την πιθανή συνεργασία του συμπαίκτη του, εκτιμώντας και τα προσδοκώμενα οφέλη μάλλον την ίδια στρατηγική θα επιλέξει. Αυτό φυσικά δε σημαίνει ότι κάθε ορθολογικός παίκτης αποφεύγει τη συνεργασία στο συγκεκριμένο παίγνιο, αλλά ότι απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξή της είναι ένας αυξημένος βαθμός αμοιβαίας εμπιστοσύνης.

2.5.3.2.2 Χαρακτηριστικές εφαρμογές του παιγνίου

Το παίγνιο βρίσκει ποικίλες εφαρμογές σε διάφορους τομείς και επιστημονικούς κλάδους, κυρίως όμως στις αλληλεπιδράσεις και σχέσεις μεταξύ ατόμων ή κοινωνικών ομάδων.

- Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα δύο κωπηλατών, οι οποίοι πρέπει να συνεργαστούν για να κατευθύνουν ένα διθέσιο κανό. Αν και οι δύο κωπηλατήσουν, τότε το κανό θα κινηθεί με επιτυχία. Αν ο ένας από τους δύο δεν το πράξει, τότε ο άλλος απλώς σπαταλά την ενέργεια του. Αντίστοιχα παραδείγματα που απαιτούν αμοιβαία συνεργασία για την ευόδωση των προσπαθειών συναντάμε πολλά στην καθημερινότητά μας.

- Αντίστοιχα παραδείγματα απαντάμε όμως και στο ζωικό βασίλειο. Αξιοπρόσεκτος είναι ο τρόπος που κυνηγά η φάλαινα όρκα. Οι όρκες λοιπόν αφού περικυκλώσουν κοπάδια ψαριών τα οδηγούν προς την επιφάνεια της θάλασσας και τα ζαλίζουν με αλλεπάλληλα χτυπήματα των ουρών τους. Η συνεργασία και στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη για το σχηματισμό ενός κυκλικού κλοιού που θα αποκόπτει κάθε τρόπο διαφυγής στα θηράματα.

Καταλήγοντας μπορούμε να πούμε ότι "Stag hunt" είναι ένα παίγνιο το οποίο χρίζει μεγαλύτερης προσοχής από αυτή που έχει λάβει μέχρι τώρα, και μπορεί να αποτελέσει ένα εργαλείο εφάμιλλο του "Prisoner's Dilemma" για την ερμηνεία και αξιολόγηση των ανθρώπινων διαδραστικών σχέσεων. Ήδη στις Η.Π.Α. οι κοινωνιολόγοι και οικονομολόγοι το χρησιμοποιούν για τη μελέτη και θέσπιση των λεγόμενων κοινωνικών και εργασιακών «συμβολαίων» μεταξύ των διαφόρων κοινωνικών ομάδων και εργασιακών τάξεων.

2.5.3.3 Το παίγνιο "Traveler's Dilemma"

Ένα ακόμη παίγνιο μη μηδενικού αθροίσματος αποτελεί το "Traveler's Dilemma", το οποίο διατύπωσε ο Kaushik Basu (1994) . Η σημασία του είναι τεράστια γιατί όπως θα φανεί και στη συνέχεια θέτει υπό αμφισβήτηση τον κανόνα της ορθολογικότητας και κατά συνέπεια τη Θεωρία Παιγνίων εν γένει.

Παράδειγμα 2.9

Μία αεροπορική εταιρία ευθύνεται για την απώλεια των αποσκευών δύο ταξιδιωτών. Το περιεχόμενο των δύο πανομοιότυπων βαλιτσών είναι δύο ίδιες αντίκες. Ένας manager της

αεροπορικής εταιρίας που αναλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος, ενημερώνει τους δύο ταξιδιώτες ότι το μέγιστο ποσό αποζημίωσης που μπορεί να διαθέσει η εταιρία είναι $100 ανά βαλίτσα. Προκειμένου δε να εκτιμηθεί η αξία του περιεχομένου, οι δύο ιδιοκτήτες θα γράψουν έναν αριθμό μεταξύ $2 και $100, αφού όμως πρώτα διαχωριστούν ο ένας από τον άλλο ώστε να αποκλειστεί η δυνατότητα της μεταξύ τους επικοινωνίας.

Επίσης τους πληροφορεί ότι αν και οι δύο γράψουν τον ίδιο αριθμό, τότε αυτός θα θεωρηθεί ως η πραγματική αξία της κάθε αποσκευής και οι δύο ταξιδιώτες θα λάβουν το ποσό αυτό ως αποζημίωση. Αν ωστόσο ο ένας από τους δύο γράψει μικρότερο αριθμό από τον άλλον, τότε ο μικρότερος αριθμός θα θεωρηθεί ως η πραγματική αξία των αποσκευών, και η αποζημίωση θα γίνει με βάση το ποσό αυτό, με μία όμως διαφοροποίηση. Αυτός που έγραψε το μικρότερο ποσό θα λαμβάνει μία προσαύξηση $2, ενώ εκείνος που έγραψε το μεγαλύτερο ποσό θα υφίσταται μία μείωση $2 επί του προαναφερόμενου ποσού.

Το ερώτημα λοιπόν που γεννάται είναι το εξής. Ποια από τις δύο στρατηγικές πρέπει να ακολουθήσουν οι δύο παίκτες; Της «μειοδοσίας» ή της «πλειοδοσίας»;

Λύση

Αρχικά σχηματίζουμε τον πίνακα πληρωμών του παιγνίου, που είναι ο πίνακας 2.20. Παρατηρώντας τον εύκολα μπορεί να διαπιστώσει κάποιος, ότι μία παραλλαγή του παιγνίου όπου κάθε παίκτης διαθέτει δύο μόνο επιλογές το καθιστά πανομοιότυπο με το PD. 2

Πίνακας 2.20 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου “Traveller’s Dilemma”

	100	**99**	**…**	**3**	**2**
100	*100,100*	*97,101*	*…*	*1,5*	*0,4*
99	*101,97*	*99,99*	*…*	*1,5*	*0,4*
…	*…*	*…*	*…*	*…*	*…*
3	*5,1*	*5,1*	*…*	*3,3*	*0,4*
2	*4,0*	*4,0*	*…*	*4,0*	*2,2*

Τώρα όσον αφορά το παίγνιο στην πραγματική του μορφή μπορεί να προσδιοριστεί ότι το σημείο ισορροπίας Nash είναι το (2,2), σύμφωνα και με το μαθηματικό κανόνα της υποενότητας 2.5.2.2.

Η Θεωρία Παιγνίων λοιπόν και ο κανόνας της ορθολογικότητας υπαγορεύουν και στους δύο παίκτες να γράψουν τον αριθμό 2. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής.

Προφανώς η αρχική ιδέα του παίκτη Α είναι να επιλέξει το μέγιστο δυνατό αριθμό, δηλαδή το 100, και στην περίπτωση αυτή να λάβει $100, αν και ο παίκτης Β είναι εξίσου φιλόδοξος. Μάλιστα αν η πραγματική αξία της κάθε αντίκας είναι αρκετά μικρότερη από $100 τότε οι δύο ταξιδιώτες μπορούν να αποκομίσουν και σημαντικό όφελος και να θεωρούν αφελή τον τρόπο που επέλεξε ο manager για να τους αποζημιώσει.

Σύντομα ωστόσο ο παίκτης Α θα αντιληφθεί ότι είναι προτιμότερο να επιλέξει τον αριθμό 99, καθώς στην περίπτωση αυτή μπορεί να αυξήσει το κέρδος του, λαμβάνοντας $101. Ωστόσο αυτή τη σκέψη είναι βέβαιο ότι θα κάνει και ο παίκτης Β, και αν και οι δύο γράψουν τον αριθμό 99, θα λάβουν από $99 έκαστος. Βλέποντας αυτήν την εξέλιξη ο παίκτης Α είναι απολύτως λογικό ότι η επόμενη κίνησή του θα είναι να γράψει τον αριθμό 98, ώστε να λάβει $100. Την ίδια ωστόσο αντίδραση θα έχει και ο παίκτης Β, γεγονός που στη συνέχεια θα αναγκάσει τον παίκτη Α να γράψει τον αριθμό 98, ώστε να λάβει $97, κ.ο.κ. Συνεχίζοντας με αυτή τη λογική είναι δεδομένο ότι οι δύο ταξιδιώτες θα καταλήξουν στον ελάχιστο επιτρεπόμενο αριθμό που στην περίπτωσή μας είναι το 2.

Πράγματι λοιπόν η επιλογή του αριθμού 2 υπαγορεύεται από τον κανόνα της ορθολογικότητας. Όταν ωστόσο το παίγνιο επαναλήφθηκε πολλές φορές, υπό μορφή πειράματος, οι περισσότεροι συμμετέχοντες επέλεγαν είτε το 100 είτε τιμές πλησίον αυτού. Πολλοί εξ' αυτών δε, είχαν αντιληφθεί ότι η επιλογή τους αντιβαίνει τον κανόνα της ορθολογικότητας.

Οι ταξιδιώτες συνεπώς του παιγνίου έχουν κίνητρο να αποκλίνουν από την ισορροπία Nash και μάλιστα τα οφέλη που αποκομίζουν είναι πολύ υψηλότερα από εκείνα που θα λάμβαναν αν ακολουθούσαν μία ορθολογική στρατηγική. Το πείραμα λοιπόν αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με προηγούμενα που έδειχναν μία τάση των παικτών προς τις ορθολογικές επιλογές και καταρρίπτει τον ισχυρισμό ότι οι ορθολογικές επιλογές εξασφαλίζουν στους παίκτες υψηλότερο κέρδος. Αυτό το παράδοξο έθεσε υπό αμφισβήτηση βασικές αρχές της θεωρίας παιγνίων και ανάγκασε τους υποστηρικτές της να προβληματιστούν.

Ας προσπαθήσουμε ωστόσο να διεισδύσουμε σ' αυτό το παράδοξο και να επισημάνουμε ορισμένα κομβικά σημεία του προβλήματος, τα οποία επηρεάζουν το αποτέλεσμα του πειράματος.

i. Μία σημαντική παράμετρος του παιγνίου η οποία παραλείπεται από τον Kaushik Basu, σκόπιμα ή μη, είναι η πραγματική αξία της αντίκας. Ορισμένοι επικριτές του "Traveller's Dilemma" ισχυρίστηκαν ότι η τιμή αυτή μπορεί να αποτελέσει το

κατώτατο όριο για ένα λογικό παίκτη, καθώς θα είναι παράλογο να επιλέξεις τον αριθμό 2, όταν η πραγματική αξία της αντίκας είναι για παράδειγμα $50.

Ο ισχυρισμός αυτός ωστόσο δεν είναι και τόσο βάσιμος. Ο λόγος είναι ότι για τους δύο παίκτες υπάρχει ήδη η εναλλακτική υψηλότερη επιλογή των $100. Ακολουθώντας την ίδια τακτική της μειοδοσίας που υπαγορεύεται από τον κανόνα της ορθολογικότητας, είναι δεδομένο ότι η κατάληξη θα είναι τα $2, ανεξάρτητα από το αν ο «πλειστηριασμός» αυτός ξεκινά από τα $100 ή τα $50. Αυτό που στην ουσία αλλάζει είναι το σημείο εκκίνησης και τίποτα περισσότερο.

ii. Μία άλλη άποψη που κατατέθηκε είναι ότι η ύπαρξη πιθανής «τιμωρίας» θα ανάγκαζε τους δύο παίκτες να είναι πιο προσεκτικοί στην επιλογή τους και θα τους «έσπρωχνε» προς την ισορροπία Nash.
Πράγματι οι δύο παίκτες έχουν περισσότερα να κερδίσουν και ελάχιστα να χάσουν, γεγονός που τους ωθεί στην επιλογή ενός αριθμού πλησίον του 100. Για παράδειγμα στην ακραία περίπτωση που ο ένας ταξιδιώτης γράφει $99 και ο άλλος $2, τότε ο πρώτος δεν κερδίζει αλλά και δε χάνει τίποτα. Θα ενεργούσε όμως το ίδιο αν ήταν υποχρεωμένος να πληρώσει ένα τίμημα ίσο με τη διαφορά των δύο ποσών, δηλαδή $97; Προφανώς όχι.

Οι παραπάνω ήταν δύο μόνο από τις παρατηρήσεις που έχουν κάνει επικριτές του πειράματος και οι οποίες συνηγορούν ότι το αποτέλεσμα του παιγνίου θα μπορούσε να είναι πολύ διαφορετικό με μία μικρή διαφοροποίηση των παραμέτρων του. Οι αλλαγές αυτές θα ενίσχυαν και πιθανότατα θα καθιστούσαν επιβεβλημένη την επιλογή μίας ορθολογικής στρατηγικής από τους δύο παίκτες.

Οι διαπιστώσεις αυτές ωστόσο δεν αναιρούν την επιτυχία του πειράματος του Kaushik Basu, που απέδειξε μία μεγάλη αλήθεια και δημιούργησε προβληματισμούς στους μελετητές της Θεωρίας Παιγνίων. Κατερρίφθη το στερεότυπο που υπαγόρευε ότι η επιλογή της ορθολογικής στρατηγικής από ένα παίκτη οδηγεί ***πάντα*** στη μεγιστοποίηση των κερδών του ή στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του.

Και επίσης επιβεβαιώνεται η άποψη ότι όλοι οι άνθρωποι λειτουργούν διαφορετικά υπό διαφορετικές περιστάσεις και ***η στρατηγική της ισορροπίας Nash δε μπορεί να προβλέψει πάντοτε με επιτυχία τον ανθρώπινο παράγοντα.***

Καταλήγοντας ενδιαφέρον έχει να παραθέσουμε τα αποτελέσματα ενός πειράματος που πραγματοποίησε μία ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου Hohenheim της Στουτγάρδης πάνω στο Traveler's Dilemma. Η διαφορά του σε σχέση με τα υπόλοιπα ήταν ότι το δείγμα αποτελούσαν 47 μέλη της επίσημης επιστημονικής κοινότητας της Θεωρίας Παιγνίων και ως εκ τούτου τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είχαν μεγαλύτερη βαρύτητα.

Ζητήθηκε λοιπόν από τους ειδικούς να παίξουν το παίγνιο επιλέγοντας μία και μόνο αμιγή στρατηγική. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.21 Αποτελέσματα του πειράματος Traveler's Dilemma

Στρατηγική	***Επιλογές***	***Στρατηγική***	***Επιλογές***	***Στρατηγική***	***Επιλογές***
2*	3	88	1	96	3
4	1	90	1	97	6
31	1	93	1	98	9
49	1	94	2	99	3
70	1	95	2	100	10

Όπως γίνεται αντιληπτό οι επιλογές των ειδικών δε διαφέρουν από αυτές των συμμετεχόντων σε άλλα πειράματα. Και πάλι παρατηρείται μία συσσώρευση στην τιμή 100 και στις τιμές πλησίον αυτής, καθώς 38 παίκτες (ποσοστό 80,85%) επέλεξαν τη στρατηγική τους στο διάστημα [88,100], ενώ μόλις 3 (ποσοστό 6,38 %) επέλεξαν τη στρατηγική ισορροπίας Nash.

Εκείνο ωστόσο που χρίζει σχολιασμού, είναι το γεγονός ότι 10 (ποσοστό 21,27%) από τους ειδικούς αψήφησαν παντελώς τον κανόνα της ορθολογικότητας και επέλεξαν τη στρατηγική εκείνη που είναι υποδεέστερη όλων των υπολοίπων, δηλαδή τη στρατηγική 100!

Έτσι αποδεικνύεται ότι η Θεωρία Παιγνίων μπορεί μεν να συνιστά ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την πρόβλεψη και εκτίμηση των στρατηγικών επιλογών ενός παίκτη, ωστόσο η ανθρώπινη ψυχολογία αποτελεί έναν ισχυρό αλλά και αστάθμητο παράγοντα για τη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Και μάλιστα σε τέτοιο βαθμό που καθιστά τελείως απρόβλεπτες τις επιλογές των παικτών.

2.5.3.4 Το παίγνιο "Chicken Game"

Το "Chicken Game" είναι ένα πολύ σημαντικό παίγνιο που περιγράφει άριστα την κατάσταση ισχυρού ανταγωνισμού μεταξύ δύο παικτών. Η γενική αρχή του παιγνίου είναι πως ενώ ο κάθε παίκτης προσπαθεί να αποφύγει την υποταγή στον άλλον, εντούτοις το αποτέλεσμα που παρατηρείται σε περίπτωση που κανένας δεν υποχωρήσει είναι το χειρότερο και για τους δύο.

Την ονομασία του την οφείλει στην κινηματογραφική ταινία "Rebel without a Cause", στην οποία δύο ατίθασοι νεαροί ο James Dean και ο Buzz Gunderson οδηγούν δύο αυτοκίνητα προς ένα γκρεμό. Όποιος από τους δύο εγκαταλείψει πρώτος το αυτοκίνητο του θεωρείται δειλός («κότα»), ενώ ο αντίπαλός του είναι νικητής και κερδίζει το θαυμασμό της Natalie Wood για χάρη της οποίας γίνεται η μονομαχία. Αν όμως κανένας από τους δύο δεν υποχωρήσει, τότε το τέλος είναι ολέθριο και για τους δυο.

Η παραπάνω ονομασία του παιγνίου χρησιμοποιείται συνήθως στις πολιτικές και οικονομικές επιστήμες, όπου μπορεί επίσης να αναφερθεί και ως "War of attrition" ή "Brinkmanship" . Στη βιολογία όμως, και σε άλλες ιατρικές κυρίως επιστήμες, το συναντάμε με την ονομασία "Hawk-Dove" ("Γεράκι-Περιστέρι"), χωρίς όμως άλλες ουσιαστικές διαφορές.

Στην πράξη παρουσιάζει ομοιότητα με το "Prisoner's Dilemma" διότι και οι δύο παίκτες έχουν κίνητρο να αποκλίνουν από την αμοιβαία αποδεκτή λύση. Η διαφορά έγκειται στο κόστος απόκλισης από την ισορροπία Nash που στην περίπτωση του "Chicken Game" μοιάζει απαγορευτικό. Όπως αποδείχθηκε και πειραματικά αυτός είναι ο λόγος που ακόμη και όταν το παίγνιο επαναλαμβάνεται πολλές φορές δεν παρατηρούνται συμπεριφορές αντεκδίκησης, και συχνά προτιμάται η χρήση μικτής στρατηγικής.

Εύκολα μπορεί κάποιος να συμπεράνει ότι το κέρδος του νικητή είναι ένα αίσθημα υπεροχής έναντι του αντιπάλου, και αντίστοιχα η ζημία για τον ηττημένο ένα αίσθημα ταπείνωσης, καταστάσεις που δύσκολα μπορούν να ποσοτικοποιηθούν, ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος της νίκης ή της ήττας.

Αυτό που ωστόσο προσδίδει ιδιαίτερο χαρακτήρα στο παίγνιο είναι το αποτέλεσμά του, όταν καμία από τις δύο πλευρές δεν υποχωρήσει. Και αυτό μπορεί να είναι ολέθριο καθώς μπορεί να ταυτιστεί με την απώλεια μιας ανθρώπινης ζωής, ή ακόμη και με τον αφανισμό ενός έθνους, αναλόγως ποιος θεωρείται ως παίκτης.

2.5.3.4.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου

Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω θα θεωρήσουμε τον παρακάτω ενδεικτικό πίνακα πληρωμών "Chicken Game".

Πίνακας 2.22 Γενικός πίνακας πληρωμών παιγνίου "Chicken Game"

		ΠΑΙΚΤΗΣ Β	
		ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ	ΕΠΙΘΕΣΗ
ΠΑΙΚΤΗΣ Α	ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ	(3,3)	(2,5)
	ΕΠΙΘΕΣΗ	(5,2)	(1,1)

Από μία πρώτη ανάγνωση του πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι δεν πρόκειται για παίγνιο συνεργασίας (§4.2.3.1), αλλά για ανταγωνιστικό παίγνιο. Μάλιστα αποδεικνύεται εύκολα (www.wikipedia.org) ότι ***όλα τα ανταγωνιστικά παίγνια παρουσιάζουν δύο ισορροπίες Nash με χρήση αμιγούς στρατηγικής καθώς και μία ισορροπία Nash που επιτυγχάνεται με χρήση μικτής στρατηγικής από τον κάθε παίκτη.*** Στην περίπτωσή μας η ισορροπία Nash επιτυγχάνεται όταν ο κάθε παίκτης υποχωρεί με πιθανότητα 1/5.

Η δεύτερη παρατήρηση είναι ότι οι δύο ισορροπίες Nash αμιγούς στρατηγικής του παιγνίου, είναι και βέλτιστες κατά Paretto. Αυτή είναι και η σημαντική διαφορά του "Chicken Game" σε σχέση με το "Prisoner's Dilemma", όπου η ισορροπία Nash δεν ικανοποιεί το κριτήριο βελτιστοποίησης του Pareto.

Πίνακας 2.23 Γενικός πίνακας πληρωμών παιγνίου "Prisoner's Dilemma"

		ΠΑΙΚΤΗΣ Β	
		ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ	ΕΠΙΘΕΣΗ
ΠΑΙΚΤΗΣ Α	ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ	(3,3)	(0,5)
	ΕΠΙΘΕΣΗ	(5,0)	(1,1)

Επιχειρώντας μία σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο πολύ σπουδαίων παιγνίων, μπορούμε να πούμε ότι και τα δύο προσφέρουν μία αμοιβαία αποδεκτή και συμβιβαστική λύση (ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ, ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ), η οποία ενισχύεται υπό το φόβο των συνεπειών μίας αμοιβαία επιθετικής τακτικής (ΕΠΙΘΕΣΗ, ΕΠΙΘΕΣΗ).

Η διαφορά τους εντοπίζεται κυρίως στην αντίδραση του κάθε παίκτη, όταν ο αντίπαλός του αλλάξει στρατηγική. Υποθέτοντας ότι ο παίκτης Α διαφοροποιείται και επιλέγει τη στρατηγική της επίθεσης, η καλύτερη αντίδραση για τον παίκτη Β του "Prisoner's Dilemma" είναι να επιτεθεί και αυτός, προσδοκώντας στο αποτέλεσμα (1,1) αντί του (5,0). Αντίθετα για τον παίκτη Β του "Chicken Game" η βέλτιστη επιλογή είναι η διατήρηση της στρατηγικής του προτιμώντας το αποτέλεσμα (5,2) από το (1,1). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το "Chicken Game" αποτρέπει τους παίκτες να λειτουργήσουν με το αίσθημα της εκδίκησης.

Οι εφαρμογές του παιγνίου στην καθημερινή ζωή είναι πολλές και σημαντικές. Ως αριθμητικό παράδειγμα θα μελετηθεί η «κρίση της Κούβας», η πρώτη και ίσως πλέον κρίσιμη στιγμή που η ανθρωπότητα βρέθηκε αντιμέτωπη με το φάσμα του πυρηνικού πολέμου.

Παράδειγμα 2.10 (Cuban missile crisis)

Ήταν Οκτώβρης του 1962 και ο αποκαλούμενος «Ψυχρός Πόλεμος» ανάμεσα σε Η.Π.Α. και Ε.Σ.Σ.Δ. βρισκόταν στο αποκορύφωμα του. Εκείνο το μήνα οι Αμερικανοί αντιλήφθηκαν ότι ο εχθρός τους κατασκεύαζε μία βάση με πυρηνικούς πυραύλους στην Κούβα. Αποφάσισαν λοιπόν να στήσουν ναυτική ενέδρα σε ρώσικο πλοίο ανεφοδιασμού που κινούταν προς το νησί. Ενδεχόμενη συνάντηση των δύο πλοίων θα μπορούσε να έχει τραγικές συνέπειες για τις δύο πλευρές και όχι μόνο. Τελικά αυτό απεφεύχθη καθώς οι Ρώσοι άλλαξαν κατεύθυνση και υποχώρησαν, επιτρέποντας στους Αμερικανούς να χριστούν «νικητές».

Να εξεταστούν και να αναλυθούν όλες οι πιθανές στρατηγικές που μπορούσαν να είχαν ακολουθήσει οι δύο αντίπαλοι.

Λύση

Παρότι είναι αδύνατη η περιγραφή των αποτελεσμάτων του παιγνίου με απόλυτες τιμές, ωστόσο είναι εφικτή η κατάταξή τους σε ένα πίνακα και η σχετική αξιολόγησή τους. Τα πιθανά αποτελέσματα του παιγνίου είναι είτε η υποχώρηση του ενός μόνο αντιπάλου, είτε η υποχώρηση και των δύο, είτε η επιμονή και των δύο.

Μία ενδεικτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να είναι η εξής (όπου με '1' δείχνεται το χειρότερο αποτέλεσμα, και με '4' το καλύτερο):

Η.Π.Α.		***Ε.Σ.Σ.Δ.***
(Η.Π.Α. επιμένει, Ε.Σ.Σ.Δ. υποχωρεί)	**4**	(Η.Π.Α. υποχωρεί, Ε.Σ.Σ.Δ. επιμένει)
(Η.Π.Α. υποχωρεί, Ε.Σ.Σ.Δ. υποχωρεί)	**3**	(Η.Π.Α. υποχωρεί, Ε.Σ.Σ.Δ. υποχωρεί)
(Η.Π.Α. υποχωρεί, Ε.Σ.Σ.Δ. επιμένει)	**2**	(Η.Π.Α. επιμένει, Ε.Σ.Σ.Δ. υποχωρεί)
(Η.Π.Α. επιμένει, Ε.Σ.Σ.Δ. επιμένει)	**1**	(Η.Π.Α. επιμένει , Ε.Σ.Σ.Δ. επιμένει)

Ο πίνακας πληρωμών του παιγνίου διαμορφώνεται ως εξής:

Πίνακας 2.24 Πίνακας πληρωμών του παιγνίου "Cuban missile crisis"

		Ε.Σ.Σ.Δ.	
		ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ	ΕΠΙΜΟΝΗ
Η.Π.Α.	ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ	(3,3)	(2,4)
	ΕΠΙΜΟΝΗ	(4,2)	(1,1)

Αν και οι δύο παίκτες είχαν ακολουθήσει maximin στρατηγικές, τότε θα είχαν επιλέξει την υποχώρηση και η τιμή του παιγνίου θα ήταν το ζεύγος (3,3).

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε καλύτερα όλες τις πτυχές του παιγνίου ας κάνουμε την παρακάτω υπόθεση εργασίας. Υποθέτουμε ότι στις 27 Οκτωβρίου του 1962, μία ημέρα πριν το στρατιωτικό επεισόδιο, ο πρόεδρος Kennedy πληροφορείται ότι Σοβιετικοί κατάσκοποι παρακολουθούν το επιτελείο του και οποιαδήποτε απόφαση λάβει, θα την πληροφορηθεί αμέσως ο πρωθυπουργός Khroushcov.

Πολλοί λοιπόν θα υποθέσουν ότι αυτό το γεγονός θα μπορούσε να αιφνιδιάσει τους Αμερικανούς και να εξασφαλίσει στους Ρώσους ένα πλεονέκτημα. Στη συνέχεια όμως θα αποδειχθεί ότι συμβαίνει το αντίθετο και μάλιστα ισχύει ο παρακάτω γενικός κανόνας :

Για κάθε παίκτη του "Chicken Game" η εκ των προτέρων γνώση των κινήσεων του αντιπάλου λειτουργεί εις βάρος του, υπό την προϋπόθεση ότι ο αντίπαλος είναι ενήμερος αυτής της καταστάσεως.

Συνεπώς οι σκέψεις του προέδρου Kennedy για τη στρατηγική που θα έπρεπε να ακολουθήσει ήταν οι εξής :

- "Αν αποφασίσω να υποχωρήσω ο Khroushcov θα το μάθει και μεταξύ των ζευγών (3,3) και (2,4), θα διαλέξει τη στρατηγική της επιμονής και το αποτέλεσμα του παιγνίου θα είναι το ζεύγος (2,4)".

- "Αν αποφασίσω να επιμείνω ο Khroushcov θα το μάθει και μεταξύ των δύο ζευγών (4,2) και (1,1), θα προτιμήσει τη στρατηγική της υποχώρησης και το αποτέλεσμα του παιγνίου θα είναι το ζεύγος (4,2)".

Επομένως αν ο Kennedy επέλεγε να υποχωρήσει το αποτέλεσμα του παιγνίου θα ήταν (2,4), ενώ αν επέλεγε να επιμείνει το αποτέλεσμα θα ήταν το (4,2). Λογικά σκεπτόμενος επέλεξε να επιμείνει, και επίσης λογικά οι Ρώσοι απέφυγαν μια βέβαιη πυρηνική καταστροφή.

Κάπως έτσι πρέπει να εκτυλίχθηκαν τα γεγονότα εκείνη την ημέρα. Και ακόμη κι αν η ρωσική πλευρά δεν είχε τέλεια πληροφόρηση για τις προθέσεις των Αμερικανών, μπορούσε όμως να αντιληφθεί πολύ καλύτερα το μέγεθος των συνεπειών μίας μετωπικής σύγκρουσης. Άλλωστε ήταν νωπές ακόμη οι αναμνήσεις του Β' Παγκοσμίου πολέμου όπου είκοσι εκατομμύρια ρώσοι είχαν χάσει τη ζωή τους, ενώ αντίθετα οι Αμερικανοί δεν είχαν ζήσει τόσο έντονα αυτόν το φρικτό πόλεμο.

Στην πραγματικότητα αυτό που συνέβη ήταν ότι οι Ρώσοι τήρησαν στάση αναμονής και έλαβαν την απόφασή τους, αφού το είχαν πράξει πρώτα οι Αμερικανοί. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί η ρωσική διπλωματία να ηττήθηκε στη μάχη των εντυπώσεων, στην οποία επικράτησαν οι Αμερικάνοι πολιτικοί, οι πραγματικοί ωστόσο νικητές ήταν με βεβαιότητα οι πολίτες των δύο κρατών.

2.5.3.5 Το παίγνιο "Volunteer's Dilemma"

Το "Volunteer's Dilemma" περιγράφει μία κατάσταση όπου καθένας από τους Ν παίκτες καλείται να επιλέξει ανάμεσα σε μια μικρή ατομική θυσία, η οποία λειτουργεί προς όφελος όλων, και στην αδιαφορία. Στην ουσία αποτελεί μία μορφή του "Chicken Game"με πολλούς παίκτες.

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η διακοπή ρεύματος σε μία συνοικία εξαιτίας ενός βραχυκυκλώματος. Όλοι οι κάτοικοι γνωρίζουν πως για να επιδιορθωθεί η βλάβη πρέπει ένας τουλάχιστον από αυτούς να ειδοποιήσει τη Δ.Ε.Η. για να στείλει τους τεχνικούς της. Αν κανένας δεν προθυμοποιηθεί τότε το αποτέλεσμα είναι το χειρότερο για όλους τους συμμετέχοντες. Αν κάποιος δράσει ως εθελοντής, τότε οι υπόλοιποι επωφελούνται χωρίς να κουραστούν.

Πίνακας 2.25 Γενικός πίνακας πληρωμών του παιγνίου “Volunteer’s Dilemma”

	ΕΝΑΣ ΤΟΥΛΑΧΙΣΤΟΝ ΠΑΙΚΤΗΣ ΑΥΤΟΘΥΣΙΑΖΕΤΑΙ	ΚΑΝΕΙΣ ΆΛΛΟΣ ΠΑΙΚΤΗΣ ΔΕΝ ΑΥΤΟΘΥΣΙΑΖΕΤΑΙ
ΑΥΤΟΘΥΣΙΑ	1	0
ΛΙΠΟΤΑΞΙΑ	2	-10

Η τιμή “1” στο πάνω αριστερό κελί υποδηλώνει το όφελος της επαναφοράς του ρεύματος που απολαμβάνει κάποιος (2) μείον τη μικρή ταλαιπωρία της ειδοποίησης της Δ.Ε.Η.. Επειδή ορισμένοι μπορούν εύλογα να ισχυριστούν ότι δε συνιστά και ιδιαίτερο κόπο ένα απλό τηλεφώνημα, ας υποτεθεί ότι υπάρχει βλάβη στις τηλεφωνικές γραμμές και το πλησιέστερο κατάστημα της Δ.Ε.Η. απέχει δέκα χιλιόμετρα. Τότε το κίνητρο της μη «αυτοθυσίας» ενισχύεται ακόμη περισσότερο.

Πράγματι στην καθημερινότητα βρισκόμαστε πολλές φορές αντιμέτωποι με παρόμοια διλήμματα και καλούμαστε να πάρουμε τη σωστή απόφαση. Μία κλασσική τέτοια περίπτωση αποτελεί ο ξυλοδαρμός μέχρι θανάτου ς της Kitty Genovese σε μία γειτονιά της Νέας Υόρκης. Παρότι πολλοί κάτοικοι παρακολουθούσαν επί ώρα τον ξυλοδαρμό της άτυχης γυναίκας, ωστόσο κανείς τους δεν επενέβη και ελάχιστοι ειδοποίησαν την αστυνομία, πιστεύοντας ότι κάποιος άλλος θα το πράξει.

Το παραπάνω περιστατικό αποτέλεσε αφορμή για πολλές συζητήσεις αλλά και αντικείμενο έρευνας για τις κοινωνικές και πολιτικές επιστήμες αλλά και για τον κλάδο της ψυχολογίας.

2.5.3.6 Το *παίγνιο* “Battle of the sexes”

Στη θεωρία παιγνίων το παίγνιο “Battle of the sexes”, ή αλλιώς “Bach or Stravinski”, είναι ένα παίγνιο συνεργασίας δύο ατόμων. Ας υποτεθεί ότι ένα ζευγάρι, ένας άνδρας και μία γυναίκα θέλουν να πάνε στην όπερα ή σε ένα ποδοσφαιρικό αγώνα. Η γυναίκα προτιμά την όπερα, ενώ ο άνδρας το ποδόσφαιρο, αλλά θέλουν επίσης να βρίσκονται κάπου μαζί. Ένας πίνακας πληρωμών του παιγνίου που προκύπτει είναι ο πίνακας 2.26 :

Πίνακας 2.26 Πίνακας πληρωμών Α του παιγνίου “Battle of the sexes”.

		ΑΝΔΡΑΣ	
		ΟΠΕΡΑ	ΠΟΔΟΣΦΑΙΡΟ
ΓΥΝΑΙΚΑ	ΟΠΕΡΑ	(3,2)	(0,0)
	ΠΟΔΟΣΦΑΙΡΟ	(0,0)	(2,3)

Ωστόσο στην παραπάνω απεικόνιση του παιγνίου δε λαμβάνεται υπόψη η πρόσθετη ζημία που προκύπτει αν οι δύο παίκτες όχι μόνο δεν παρακολουθήσουν μαζί το ένα από τα δύο γεγονότα, αλλά καθένας από αυτούς βρεθεί και στο λάθος μέρος, δηλαδή η γυναίκα να παρακολουθήσει ποδόσφαιρο και ο άνδρας όπερα. Ένας πίνακας πληρωμών που συνυπολογίζει και αυτόν τον παράγοντα είναι ο πίνακας πληρωμών 2.27:

Πίνακας 2.27 Πίνακας πληρωμών Β του παιγνίου “Battle of the sexes”.

		ΑΝΔΡΑΣ	
		ΟΠΕΡΑ	ΠΟΔΟΣΦΑΙΡΟ
ΓΥΝΑΙΚΑ	ΟΠΕΡΑ	(3,2)	(1,1)
	ΠΟΔΟΣΦΑΙΡΟ	(0,0)	(2,3)

Αναλύοντας τον πίνακα 2.26 διαπιστώνουμε ότι παρουσιάζει δύο ισορροπίες Nash αμιγούς στρατηγικής, την πρώτη όπου και οι δύο παίκτες πηγαίνουν στην όπερα και τη δεύτερη όπου και οι δύο πηγαίνουν στον ποδοσφαιρικό αγώνα, οι οποίες είναι και βέλτιστες κατά Paretto. Επιπλέον υπάρχει και μία ισορροπία Nash που προκύπτει με χρήση μικτής στρατηγικής από τους δύο παίκτες, στην οποία καθένας από τους δύο επιλέγει την επιθυμητή του στρατηγική με πιθανότητα 3/5.

Εκείνο που αξίζει σχολιασμού είναι ότι οι δύο ισορροπίες Nash, δεν είναι ισοδύναμες, υπό την έννοια ότι ο καθένας από τους δύο παίκτες είναι περισσότερο ή λιγότερο ευνοημένος. Προφανώς η γυναίκα είναι περισσότερο ικανοποιημένη εάν το ζευγάρι παρακολουθήσει μαζί την όπερα, και αντίστοιχα ο άνδρας πιο ευνοημένος εάν παραβρεθούν από κοινού στον ποδοσφαιρικό αγώνα.

Το παραπάνω στοιχείο διαφοροποιεί το παίγνιο από όλα τα προηγούμενα που αναφέρθηκαν, όπου οι ισορροπίες Nash εξασφάλιζαν ίσα αποτελέσματα και για τους δύο παίκτες.

2.5.3.7 Το παίγνιο "Dollar auction"

Η «δημοπρασία δολαρίου» είναι ένα παίγνιο αλληλουχίας, μη-μηδενικού αθροίσματος που σχεδιάστηκε από τον οικονομολόγο Martin Shubik, για να καταδείξει το εξής παράδοξο. Πολλές φορές παίκτες που έχουν τέλεια πληροφόρηση σε ένα παίγνιο και εφαρμόζουν τον κανόνα της ορθολογικότητας, εξωθούνται στο τέλος του παιγνίου να λάβουν μία μη λογική απόφαση, η οποία όμως προήλθε από μία ακολουθία απόλυτα λογικών κινήσεων.

Παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με το "Traveler's dilemma", με την ουσιαστική όμως διαφορά ότι στο "Dollar auction" υπάρχει το στοιχείο της τιμωρίας, το οποίο όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.5.3.3 δεν υπήρχε στο πρώτο.

2.5.3.7.1. Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου

Ένας εθελοντής αναλαμβάνει να εκτελέσει τη δημοπρασία ενός δολαρίου με τους παρακάτω κανόνες. Το δολάριο καταλήγει στον πλειοδότη, ο οποίος πληρώνει ένα αντίτιμο ίσο με το ποσό της πλειοδοσίας. Ο δεύτερος κατά σειρά πλειοδότης υποχρεούται να πληρώσει το ποσό που προσέφερε κατά τη δημοπρασία, χωρίς όμως να λάβει κανένα αντάλλαγμα.

Ας υποθέσουμε ότι ως ποσό εκκίνησης λαμβάνεται το 1 cent, οπότε ο κάθε παίκτης προσδοκά σε ένα όφελος 99 cents. Άμεσα κάποιος άλλος θα πλειοδοτήσει με 2 cents, και η διαδικασία θα συνεχιστεί με τον ίδιο τρόπο μέχρι το ποσό πλειοδοσίας να φτάσει τα 99 cents. Αν υποτεθεί ότι το προηγούμενο προσφερόμενο ποσό είναι τα 98 cents, υπάρχουν δύο εκδοχές για τον προσωρινό μειοδότη. Είτε να χάσει 98 cents, είτε να αυξήσει την προσφορά του στο $1, μηδενίζοντας το προσδοκώμενο κέρδος του.

Στη συνέχεια ο πρώτος παίκτης μπορεί να συμβιβαστεί με την απώλεια των 99 cents, ή να αυξήσει την προσφορά του στο $1.01, προσδοκώντας στην ελάχιστη απώλεια του 1 cent. Από το σημείο αυτό και μετά και για όσο συνεχιστεί η δημοπρασία, οι παίκτες δε θα έχουν να προσμένουν σε κέρδος παρά μόνο σε αύξηση των απωλειών τους.

Παρότι οι παίκτες λοιπόν ακολουθούν τον κανόνα της ορθολογικότητας, το αποτέλεσμα του παιγνίου δεν αποδεικνύεται ευνοϊκό για αυτούς. Πρέπει λοιπόν να εξεταστούν και άλλες στρατηγικές περισσότερο προσοδοφόρες για τους παίκτες.

Μία τέτοια στρατηγική είναι να προσφέρουν και οι δύο παίκτες από 2 cents. Στην περίπτωση αυτή μοιράζονται το δολάριο, και ο καθένας τους κερδίζει από 49 cents. Η μέθοδος αυτή όμως παραβλέπει ότι πρόκειται για ανοικτή δημοπρασία, όπου μπορούν να συμμετάσχουν περισσότεροι παίκτες και μάλιστα μέχρι το όριο των 98 cents, θα έχουν και βάσιμο λόγο να το πράξουν.

Ένας άλλος τρόπος για να λήξει η δημοπρασία είναι ο διαγωνιζόμενος να προσφέρει 99 cents περισσότερα από την προηγούμενη προσφορά, μην αφήνοντας περιθώρια για καμία προσφορά που αποφέρει υψηλότερο κέρδος (ή μικρότερη ζημία). Έστω για παράδειγμα ότι ο παίκτης 1 προσφέρει $x , και ο παίκτης 2 πλειοδοτεί με $x+$0.99. Αν ο παίκτης 1 απαντήσει με μία προσφορά $x+$0.99+$0.01, αυτό σημαίνει ότι έχει μία ζημία ($x+$0.99+$0.01)-$1=$x, όση δηλαδή θα είχε αν δεν είχε προβεί σε δεύτερη προσφορά.

Αν μάλιστα με την εκκίνηση της κάθε δημοπρασίας ο πρώτος διαγωνιζόμενος προσφέρει αμέσως $0.99 δεν πρόκειται να μειοδοτήσει έναντι κανενός άλλου λογικού διαγωνιζόμενου, ο οποίος προσβλέπει στο κέρδος. Έτσι ο πρώτος διαγωνιζόμενος θα αποκομίσει κέρδος $0.01, ενώ ο δεύτερος δε θα κερδίσει, ούτε όμως και θα χάσει κάποιο ποσό.

Καταλήγοντας μπορούμε να πούμε ότι το συγκεκριμένο παίγνιο έθεσε υπό αμφισβήτηση και τους υπολογισμούς της εκτιμώμενης τιμής του παιγνίου. Ένας τυπικός σχεδιασμός στρατηγικής υπαγορεύει ότι με την τρέχουσα προσφορά στα 99 cents, και την αμέσως μικρότερη προσφορά στα 98 cents, η υποψήφια επόμενη προσφορά του διαγωνιζόμενου θα καθοριζόταν από τους εξής παράγοντες :

- Απώλεια 98 cents.
- Απόκτηση ενός δολαρίου, με αντάλλαγμα $1. Δηλαδή μηδενικό κέρδος, αλλά και μηδενική ζημία.

Αυτός ωστόσο αποδεικνύεται ένας ατελής σχεδιασμός στρατηγικής του παιγνίου. Η εκτιμώμενη τιμή του παιγνίου έπειτα από πιθανή επόμενη προσφορά δε μπορεί να θεωρηθεί μηδέν εξαιτίας της επαναλαμβανόμενης φύσης του παιγνίου. Στην πραγματικότητα, η εκτιμώμενη τιμή του παιγνίου υπολογίζεται ως εξής:

Αν p είναι η πιθανότητα να σταματήσει ο αντίπαλος σε αυτό το σημείο και (1-p) να συνεχίσει τη δημοπρασία, τότε : V(A) = $0 xp+ ($-0.02)x(1-p), σε μία πιθανή επαναλαμβανόμενη σειρά με μία απεριόριστη ζημία.

2.5.3.8 Το παίγνιο "Deadlock"

2.5.3.8.1 Περιγραφή και ανάλυση του παιγνίου

Το παίγνιο περιγράφει μία κατάσταση όπου δύο ή περισσότερες ανταγωνιστικές διαδικασίες αναμένουν η μία την ολοκλήρωση της άλλης, και γι' αυτό το λόγο καμία από τις δύο δεν τερματίζεται. Προϊδεάζει στη γνωστή λαϊκή ρήση «η κότα έκανε το αβγό ή το αβγό την κότα», αλλά ένα πιο ρεαλιστικό παράδειγμα που περιγράφει σωστά το παίγνιο είναι το εξής.

"Δύο τρένα κινούμενα σε αντίθετη κατεύθυνση πλησιάζουν ένα κόμβο μονής διελεύσεως. Και τα δύο πρέπει να ακινητοποιηθούν, και κανένα από τα δύο δε μπορεί να επανεκκινήσει αν το άλλο δεν έχει διέλθει από τον κόμβο."

Από μαθηματικής απόψεως μπορεί να θεωρηθεί ως το απλούστερο από τα προαναφερθέντα παίγνια, καθώς ο κάθε παίκτης έχει μία κυρίαρχη στρατηγική και η ισορροπία Nash είναι και βέλτιστη κατά Paretto. Όπως και στο "Prisoner's Dilemma" ο κάθε παίκτης προσμένει στη συνεργασία του αντιπάλου ώστε να μεγιστοποιήσει τα κέρδη του, όμως στο τέλος και οι δύο επιλέγουν τη στρατηγική της διαφοροποίησης, και καταλήγουν στην ισορροπία Nash (2,2) του πίνακα 2.28.

Ένας πίνακας πληρωμών του παιγνίου είναι ο παρακάτω:

Πίνακας 2.28 Γενικός πίνακας πληρωμών του παιγνίου "Deadlock"

(1,1)	(0,3)
(3,0)	(2,2)

2.5.3.8.2 Το "Coffman deadlock"

Οι εφαρμογές του παιγνίου είναι πολλές και σημαντικές, ιδιαίτερα στην επιστήμη των υπολογιστών. Σε αυτόν τον επιστημονικό κλάδο το παίγνιο είναι γνωστό ως "Coffman deadlock", και οφείλει την ονομασία του στον καθηγητή υπολογιστών E.G. Coffman.

Το "Coffman deadlock" αναφέρεται στη συνθήκη όπου δύο διεργασίες περιμένουν αμφότερες την απελευθέρωση ενός πόρου, ή, όταν περισσότερες από δύο διεργασίες αναμένουν σε μία κυκλική αλυσίδα για τον ίδιο σκοπό. Το Deadlock είναι ένα σύνηθες πρόβλημα στον προγραμματισμό πολλαπλών διεργασιών, όπου περισσότερες διεργασίες μοιράζονται έναν αμοιβαία αποκλειόμενο πόρο, γνωστό και ως software lock. Υπολογιστές σχεδιασμένοι για την υλοποίηση on-line αγορών σε πραγματικό χρόνο είναι συνήθως εξοπλισμένοι με ένα hardware lock που εγγυάται την αποκλειστική υλοποίηση κάθε διεργασίας, υποστηρίζοντας έτσι την ασφάλεια των αγορών, και επιτρέποντας διαδοχική και όχι ταυτόχρονη πρόσβαση στους χρήστες. Τα προβλήματα deadlock είναι δυσεπίλυτα καθώς δεν υπάρχει γενικός κανόνας για τη λύση τους.

Η παραπάνω κατάσταση ομοιάζει με την περίσταση όπου δύο άτομα προσπαθούν να σχεδιάσουν ένα σχέδιο, έχοντας όμως στη διάθεση τους ένα μολύβι κι ένα χάρακα κοινής χρήσης. Αν ο ένας κατέχει το μολύβι και ο άλλος το χάρακα, τότε παρουσιάζεται ένα πρόβλημα deadlock όταν ο πρώτος χρειαστεί το χάρακα και ο δεύτερος το μολύβι. Καμία από τις δύο απαιτήσεις δε μπορεί να ικανοποιηθεί, κι έτσι δημιουργείται ένα deadlock.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ορισμένα από τα σημαντικότερα παίγνια της θεωρίας παιγνίων, ενώ αναφέρθηκαν επιγραμματικά και πολλές κατηγορίες εφαρμογών τους. Διαπιστώθηκε ότι μεγάλη χρησιμότητα επιδεικνύουν τα παίγνια μη-μηδενικού αθροίσματος, όπως το "chicken game" και το "prisoner's dilemma", τα οποία προσομοιώνουν ιδανικά τις καταστάσεις έντονου ανταγωνισμού που υπάρχουν στη σημερινή παγκόσμια πραγματικότητα.

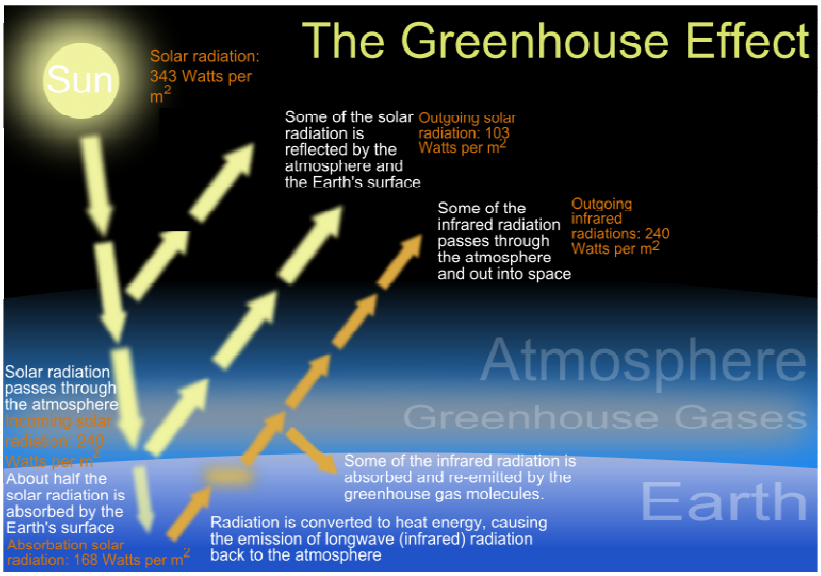
Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου θα εξεταστούν οι εφαρμογές της θεωρίας παιγνίων σε ένα παγκόσμιο οικολογικό πρόβλημα με συνεχώς αυξανόμενες διαστάσεις, γνωστό ως «το φαινόμενο του θερμοκηπίου». Αρχικά σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μία σύντομη ανάλυση του φαινομένου, ώστε να γίνει κατανοητή στον αναγνώστη η βάση του προβλήματος, αλλά και πως μπορεί να γίνει η προσέγγιση αυτού με κανόνες και έννοιες της θεωρίας παιγνίων.

Στη συνέχεια και στην §3.2 θα γίνει ανάλυση τεσσάρων επιλεγμένων δημοσιευμένων άρθρων της σύγχρονης βιβλιογραφίας που αναζητούν τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα, καθώς και παρουσίαση των αποτελεσμάτων στα οποία καταλήγουν. Τέλος, στην §3.3 επιχειρείται μία σύγκριση και αξιολόγηση των παραπάνω, και κατατίθεται η προσωπική άποψη του υποφαινόμενου για την καλύτερη αντιμετώπιση του συγκεκριμένου ζητήματος.

3.1.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου ως φυσική διεργασία

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια διαδικασία κατά την οποία η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία πλανητική επιφάνεια απορροφάται από «αέρια του θερμοκηπίου» που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Μέρος της επανεκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατευθύνεται και προς την επιφάνεια του πλανήτη, κι έτσι μεταφέρεται ενέργεια προς αυτήν αλλά και τα χαμηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Το αποτέλεσμα είναι η θερμοκρασία στα σημεία αυτά να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα υπήρχε αν η μόνη πηγή θερμικής ενέργειας ήταν η ηλιακή ακτινοβολία.

Παρά την κοινή τους ονομασία, ο συγκεκριμένος μηχανισμός θέρμανσης παρουσιάζει από φυσικής απόψεως θεμελιώδεις διαφορές από ένα γνωστό σε όλους μας θερμοκήπιο, όπου ο θερμός αέρας απλώς απομονώνεται εντός της κατασκευής και δεν παρατηρούνται απώλειες λόγω μεταγωγής της θερμότητας. Η διεργασία που συντελείται στη γήινη ατμόσφαιρα είναι περισσότερο περίπλοκη, περιλαμβάνει μεταγωγές θερμότητας αλλά και μετατροπές της ηλιακής σε υπέρυθρη ακτινοβολία, και περιγράφεται σχηματικά στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Ο κύκλος του φαινομένου του θερμοκηπίου (Πηγή : Wikipedia)

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου ανακαλύφθηκε από τον Joseph Fourier το 1824, αποδείχθηκε πειραματικά από τον John Tyndall το 1858, και καταγράφηκε ποσοτικά από τον Svante Arrhenious το 1896.

Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία ας θεωρηθεί ένα τέλειο θερμικά αγώγιμο «μαύρο σώμα» που απέχει από τον ήλιο ίδια απόσταση όσο και η Γη. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του θα ήταν 5.3 °C. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η Γη αντανακλά περίπου το 30% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας η ενεργή θερμοκρασία (η θερμοκρασία ενός «μαύρου σώματος» που αντανακλά ίσο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας) του πλανήτη θα έπρεπε να κυμαίνεται από -18°C έως -19°C, δηλαδή 33°C λιγότερο από την πραγματική θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης που κυμαίνεται μεταξύ 14°C και 15°C. Ο μηχανισμός που ευθύνεται για αυτή τη διαφορά μεταξύ της ενεργούς και της πραγματικής θερμοκρασίας συντελείται στην ατμόσφαιρα, και είναι γνωστός ως το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα τέσσερα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου, και η συνεισφορά τους στην εκδήλωση του φαινομένου είναι τα εξής :

- Υδρατμοί (H_2O) με ποσοστό 36-70%.
- Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) με ποσοστό 9-26%.
- Μεθάνιο (CH_4) με ποσοστό 4-9%.
- Όζον (O_3) με ποσοστό 3-7%.

Το μόνο στοιχείο που επίσης συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου χωρίς όμως να αποτελεί αέριο, είναι τα σύννεφα που επίσης απορροφούν και εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία και έτσι επηρεάζουν το φυσικό μηχανισμό. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι ανάλογα αέρια υπάρχουν και στην ατμόσφαιρα του Άρη, της Αφροδίτης, και, της Σελήνης.

3.1.2 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου ως παγκόσμιο οικολογικό πρόβλημα

Ο μηχανισμός που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα αποτελεί ζωογόνο πηγή και ουσιαστικά διαφοροποιεί τη Γη από τους υπόλοιπους πλανήτες. Διαμορφώνει στην επιφάνειά της τις επιθυμητές συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορούν να ευδοκιμήσουν πολλά είδη χλωρίδας και πανίδας.

Συνεπώς το πραγματικό πρόβλημα δεν είναι η ύπαρξη του φαινομένου, η οποία ως ένα συγκεκριμένο βαθμό είναι ευεργετική, αλλά η αύξηση της επίδρασής του στις περιβαλλοντικές συνθήκες του πλανήτη. Εκτιμάται ότι από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης μέχρι σήμερα, η ολοένα και αυξανόμενη χρήση ορυκτών καυσίμων οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα από 280 σε 390 ppm (parts per million).

Ειδικότερα στον πίνακα 3.1 δίνεται η μεταβολή εκείνων των αερίων του θερμοκηπίου που επηρεάζονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, καθώς και η ισχύς της ακτινοβολίας που απορροφούν και επανεκπέμπουν. Εκτός από το CO_2 και το CH_4, στον πίνακα έχουν προστεθεί το νιτρώδες οξείδιο (N_20) και χημική ένωση Freon-12 που χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο στη βιομηχανία αλλά και στις οικιακές συσκευές.

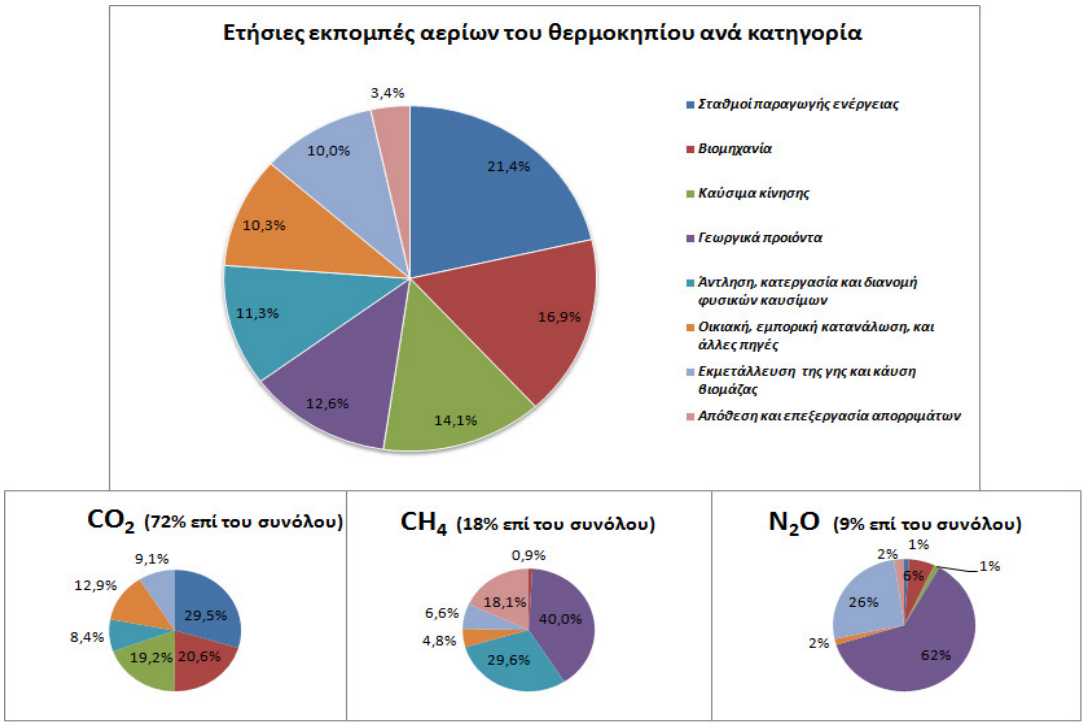
Η ποσοτική καταγραφή των παραπάνω αερίων στην ατμόσφαιρα ξεκίνησε στα τέλη του $19^{ου}$ αιώνα. Ωστόσο ένας εμπειρικός και αξιόπιστος τρόπος καταγραφής της συγκέντρωσης του CO_2 και του CH_4 στην ατμόσφαιρα υπήρξε και ο ρυθμός με τον οποίο λιώνουν τα παγόβουνα της Αρκτικής και της Ανταρκτικής.

Πίνακας 3.1 Μεταβολή των ανθρωπογενών αερίων του θερμοκηπίου (Πηγή :IPCC 2007)

Αέριο	Προβιομηχανικά επίπεδα	Σημερινά επίπεδα	Αύξηση από 1750-2010	Ισχύς ακτινοβολίας (W/m2)
CO_2	280 ppm	388 ppm	108 ppm	1.46
CH_4	700 ppb	1745 ppb	1045 ppb	0.48
N_2O	270 ppb	314 ppb	44 ppb	0.15
CFC-12	0	533 ppt	533 ppt	0.17

Αυτό που διαπίστωσαν οι επιστήμονες είναι ότι τα επίπεδα του CO_2 στην ατμόσφαιρα κυμαίνονταν μεταξύ 180 ppm και 290 ppm τουλάχιστον για τα τελευταία 800.000 έτη, πριν σημειωθεί η αύξησή τους τα τελευταία 250 χρόνια! Υπάρχουν ωστόσο βάσιμες ενδείξεις ότι για κάποια περίοδο, πριν από περίπου 500 εκατομμύρια χρόνια, τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα ήταν σχεδόν δεκαπλάσια από τα σημερινά.

Στη σημερινή εποχή οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου έχουν πολλαπλασιαστεί και οι σημαντικότερες αιτίες όπως προαναφέρθηκε είναι η καύση των φυσικών καυσίμων και η αλόγιστη εκμετάλλευση του γεωφυσικού πλούτου. Οι κυριότεροι παράγοντες της ανθρώπινης δραστηριότητας περιγράφονται στο γράφημα 3.1, τόσο για τις συνολικές εκπομπές, όσο και ανά εκπεμπόμενο αέριο.



Γράφημα 3.1 Παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά κατηγορία για το έτος 2000 (Πηγή : Energy Information Administration).

Το πρόβλημα έχει πλέον περιγραφεί από φυσικής απόψεως, ενώ έχουν εντοπιστεί συγκεντρωτικά και οι αιτίες που το προκαλούν. Για να μπορέσει όμως να αντιμετωπιστεί, πρέπει να επιμεριστούν οι ευθύνες μεταξύ των κρατών ή των περιφερειών που ευθύνονται για αυτήν την κατάσταση. Και η εύρεση ενός αμοιβαία αποδεκτού τρόπου μέτρησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, δεν είναι τόσο εύκολη.

Για την πραγματοποίηση μιας σωστής μέτρησης πρέπει να ξεκαθαριστούν τα παρακάτω σημεία:

- Ο καθορισμός των ορίων της μέτρησης. Οι εκπομπές πρέπει να επιμερίζονται στο κράτος στα γεωγραφικά όρια του οποίου παράχθηκαν, ή να χρεώνονται σε εκείνο το κράτος που επωφελείται από τη δημιουργία τους; Τέτοια ζητήματα ανακύπτουν κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των κρατών, ή κατά τη χρήση διεθνών αερολιμένων.
- Η διαφορετική διάρκεια ζωής των εκπεμπόμενων αερίων. Η συμβολή καθενός από αυτά υπολογίζεται με βάση το CO_2 και με βάση τη διάρκεια ζωής τους. Για το σκοπό αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, και να επαναϋπολογίζεται τακτικά, ο χρόνος απόσβεσης του κάθε αερίου από την ατμόσφαιρα.
- Ο σωστός επιμερισμός μεταξύ των διαφόρων παραγόντων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (βιομηχανία, γεωργία, παραγωγή ενέργειας, κ.α.). Συχνά αμφισβητείται η αξιοπιστία αυτών των αποτελεσμάτων.
- Η καθιέρωση ενός κοινού τρόπου μέτρησης για το σύνολο των κρατών του πλανήτη.

Μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικοί τρόποι μέτρησης των εκπομπών από τα διάφορα κράτη, που είναι οι εξής:

- μέτρηση των συσσωρευμένων εκπομπών για μία χρονική περίοδο
- καταγραφή της μεταβολής των εκπομπών σε σχέση με ένα έτος αναφοράς
- μέτρηση των συνολικών ετήσιων εκπομπών της κάθε χώρας
- καταγραφή των κατά κεφαλή ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από κάθε χώρα.

Ο τρόπος μέτρησης που υιοθετήθηκε από την UNFCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), ενός παγκόσμιου φορέα που συστάθηκε για την εξεύρεση μίας κοινής συμφωνίας για τη μείωση των εκπομπών, και χρησιμοποιήθηκε σε πολλά συνέδρια συμπεριλαμβανομένου και του Kyoto, είναι ο υπολογισμός των συσσωρευμένων εκπομπών από το 1990 έως σήμερα.

Ευρύτατα όμως χρησιμοποιείται και η μέτρηση των ετήσιων εκπομπών της κάθε χώρας. Με βάση αυτό το κριτήριο οι 5 χώρες ή περιφέρειες με τις περισσότερες εκπομπές για το έτος 2005 απεικονίζονται στο γράφημα 3.2. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι για το έτος αυτό οι 20 περισσότερο ρυπογόνες περιφέρειες παρήγαγαν το 80% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών!

Γράφημα 3.2 Οι 5 χώρες-περιφέρειες με τις μεγαλύτερες εκπομπές για το 2005 (Πηγή: NOAA Earth System Research Laboratory)

Από την παραπάνω περιγραφή γίνεται ξεκάθαρο ότι υπάρχει συνεχής αύξηση της συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, που οδηγούν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι συνέπειες από το φαινόμενο αυτό είναι επιβλαβείς για την πλειονότητα της χλωρίδας και της πανίδας, και μπορεί να αποδειχθούν και τραγικές για το ανθρώπινο είδος.

Ο περιορισμός των παγκόσμιων εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί κοινό καλό για το σύνολο της ανθρωπότητας, και είναι υποχρέωση όλων των κρατών να συμβάλλουν στο σκοπό αυτό. Στον αντίποδα, η επίτευξη αυτού του στόχου έχει κάποιο κόστος, μεγαλύτερο για κάποιες χώρες και μικρότερο για κάποιες άλλες.

Σίγουρα το βέλτιστο σενάριο για κάθε κράτος είναι να εισπράξει τα ευεργετικά οφέλη από τον περιορισμό της δραστηριότητας του φαινομένου, αποφεύγοντας παράλληλα το κόστος της μείωσης των δικών του εκπομπών. Τι θα συμβεί όμως αν και οι υπόλοιποι λειτουργήσουν με τον ίδιο τρόπο;

Πλέον το πρόβλημα αρχίζει να αποκτά τη μορφή των κλασσικών προβλημάτων της θεωρίας παιγνίων, που μελετήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι παίκτες του παιγνίου καλούνται να επιλέξουν μεταξύ της δημιουργίας συμμαχιών, ή της διαφοροποίησης.

Στα πλαίσια της επόμενης ενότητας εξετάζονται τέσσερα επιλεγμένα άρθρα που αναζητούν τη βέλτιστη λύση σε αυτό το παγκόσμιο οικολογικό πρόβλημα. Οι μελετητές έχουν καταφέρει να προσομοιώσουν την κατάσταση ανταγωνισμού που χαρακτηρίζει την παγκόσμια προσπάθεια περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αξιοποιώντας βασικούς κανόνες και θεωρήματα της θεωρίας παιγνίων. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στην ενότητα §3.2, ενώ στην §3.3 επιχειρείται η αξιολόγησή τους και η κατάθεση μίας τελικής πρότασης για την αντιμετώπιση του φαινομένου.

3.2 Έρευνα για την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης του φαινομένου του θερμοκηπίου

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου ιδιαίτερα από το 1990 και έπειτα είναι εκτενής, και αριθμεί περισσότερα από 1.500 δημοσιευμένα άρθρα στα διάφορα επιστημονικά περιοδικά. Στην προσπάθεια εύρεσης της βέλτιστης λύσης έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα μαθηματικά εργαλεία. Η χρήση της θεωρίας παιγνίων όμως έχει αυξηθεί εντυπωσιακά την τελευταία δεκαετία.

Το σύνολο της βιβλιογραφίας θεωρεί τον περιορισμό των εκπομπών ως ένα κοινό καλό, που επιτυγχάνεται ιδανικά από τη σύναψη μιας παγκόσμιας κλιματολογικής συμφωνίας. Το συνολικό οικονομικό κόστος της μείωσης, και πώς αυτό πρέπει να επιμεριστεί μεταξύ των οικονομικά ανομοιογενών κρατών, δεν έχει επιτρέψει μέχρι σήμερα την επιτυχία αυτού του εγχειρήματος.

Παρά τα αλλεπάλληλα συνέδρια που έχουν πραγματοποιηθεί, δεν έχει καθιερωθεί ένα δεσμευτικό νομικό πλαίσιο που θα περιορίζει τις εκπομπές των κρατών σε συγκεκριμένα επίπεδα. Έτσι οι χώρες εξακολουθούν σήμερα να εκπέμπουν GHG με βάση τις διάφορες διακρατικές συμφωνίες που έχουν συνάψει, ή όπως έχει επικρατήσει να λέγεται, με βάση το σενάριο B.A.U. (Business As Usual).

Το σύνολο των δημοσιευμένων άρθρων καλείται να δώσει αναλυτικές απαντήσεις στα παρακάτω βασικά ερωτήματα, και να συμβάλλει έτσι στην εύρεση μίας κοινώς αποδεκτής πολιτικής λύσης :

- Οι τωρινές παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Global Greenhouse Gas-GHG emissions) είναι πολύ υψηλές ή όχι;
- Ποια κράτη ή περιφέρειες πρέπει να ελαττώσουν τις εκπομπές τους;
- Και σε τι ποσοστό πρέπει να μειωθούν αυτές;

Παρακάτω θα γίνει παρουσίαση επιλεγμένων μοντέλων που είναι αντιπροσωπευτικά των διάφορων τάσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία την τελευταία δεκαετία. Μία κατηγορία άρθρων αναζητά τα βέλτιστα ατομικά επίπεδα εκπομπών για μία ενιαία περίοδο προσομοίωσης. Μία άλλη κατηγορία άρθρων εξετάζει περισσότερες περιόδους προσομοίωσης εισάγοντας και το στοιχείο των επαναδιαπραγματεύσεων των ισχυουσών κλιματολογικών συμφωνιών.

Σε κάθε περίπτωση η ανάλυση τους καλύπτει ένα ικανοποιητικό φάσμα επί του συνόλου των προτεινόμενων λύσεων, και η αξιολόγηση τους σε επόμενο στάδιο θα επιτρέψει την εξαγωγή μίας τελικής πρότασης, που θα έχει προέλθει από σφαιρική εξέταση του προβλήματος.

3.2.1 "How global is the solution to global warming?"

3.2.1.1. Εισαγωγή

Στο δημοσιευμένο αυτό άρθρο, οι Franz Hackl και Gerald J.Pruckner (2002) προσπαθούν να ανιχνεύσουν τα αίτια της αποτυχίας χάραξης μιας κοινής στρατηγικής. Αναλύοντας τα εμπειρικά δεδομένα για 135 κράτη διαπιστώνεται ότι πέραν του κοινού καλού, τα μεμονωμένα συμφέροντα των κρατών συμμετέχουν αποφασιστικά στη χάραξη της πολιτικής τους. Έτσι σε αντίθεση με την πλειονότητα της βιβλιογραφίας που προτάσσει το κοινό καλό ως καθοριστικό παράγοντα απόφασης, η συγκεκριμένη μελέτη προσπαθεί να αποδείξει ότι ουσιαστικές μειώσεις των εκπεμπόμενων αερίων μπορούν να επιτευχθούν με βάση τη βέλτιστη για την κάθε χώρα στρατηγική, σε επίπεδο εθνικής οικονομίας.

Η μη ύπαρξη ενός θεσμοθετημένου παγκόσμιου φορέα που θα έχει τη δικαιοδοσία να επιβάλλει κυρώσεις και να ενισχύει την ενότητα μιας παγκόσμιας συμμαχίας, προκαλεί τους μελετητές να εξετάσουν την οικειοθελή σύναψη συμμαχιών από τα διάφορα κράτη. Εξετάζουν λοιπόν τη σύναψη συμμαχιών με οικονομική συσχέτιση των κρατών (co-operative coalitions), και χωρίς οικονομική συσχέτιση (non-co-operative coalitions), και

αποδεικνύουν εμπειρικά ότι η πιθανότητα σύναψης σταθερών σχηματισμών για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι πολύ μικρή.

Στα πλαίσια του άρθρου παρουσιάζεται αρχικά ένα σύνολο δεδομένων καθώς και ένα μοντέλο για τον υπολογισμό του ατομικού οριακού κόστους (individual marginal cost) και της οριακής συνάρτησης ωφέλειας (marginal benefit function) για τη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου 135 χωρών. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα του μοντέλου που περιγράφουν τις βέλτιστες εκπομπές αερίων για κάθε χώρα, αλλά και για κάθε περιφέρεια, και γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου σε συγκεκριμένες μεταβλητές.

Αποδεικνύεται ότι από οικονομικής απόψεως το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής μπορεί να διαχωριστεί σε μία "εθνική" και μία "διεθνή" συνιστώσα. Τέλος εξετάζεται η οικειοθελής σύναψη περιβαλλοντικών συμμαχιών και κατά πόσο αυτές μπορούν να συνεισφέρουν στην ικανοποιητική μείωση των εκπομπών, ενώ γίνεται και μία γενική αποτίμηση του προτεινόμενου μοντέλου.

3.2.1.2 Ανάλυση του μοντέλου και της μεθόδου προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται και αναλύεται το μοντέλο προσομοίωσης καθώς και τα δεδομένα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.

3.2.1.2.1 Πηγές και Δεδομένα

Για την εμπειρική ανάλυση του μοντέλου χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το World Resource Institute και αφορούν την ετήσια εκπομπή CO_2 (E_i για κάθε χώρα i) οφειλόμενη στην ανθρώπινη δραστηριότητα, για 135 χώρες. Η ποσοστιαία αναλογία συμμετοχής των εκπεμπόμενων αερίων στην ατμοσφαιρική συσσώρευση καθορίζεται από το συντελεστή $\rho=0.64$ (Nordhaus (1994)).

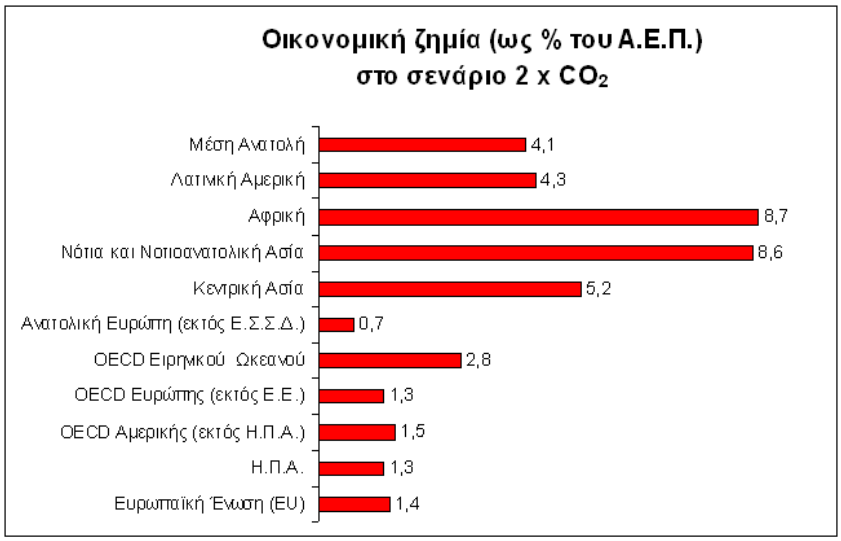
Επιπλέον η ατμοσφαιρική συγκέντρωση των GHG, C μετρούμενη σε ppm (parts per million) ανάγεται σε μονάδες βάρους ώστε να μπορεί να συγκριθεί με την ετήσια εκπομπή αερίων της κάθε χώρας. Ο συντελεστής απόσβεσης του CO_2 από την ατμόσφαιρα δ (concentration decay rate) υπολογίστηκε $\delta=0.833\%$. Η συγκεκριμένη παράμετρος περιγράφει το ρυθμό μεταφοράς CO_2 από την ατμόσφαιρα σε άλλες φυσικές δεξαμενές του πλανήτη, με σημαντικότερη τους ωκεανούς.

Εμπειρικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ρυθμών αύξησης του Α.Ε.Π. και των εκπομπών, q_i και s_i αντίστοιχα. Η διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης θεωρήθηκε m = 200 έτη, ώστε να συμβαδίζει με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ενώ ο ρυθμός μείωσης της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης των GHG υπολογίστηκε r = 4%.

3.2.1.2.2 Κατηγοριοποίηση των μοντέλων προσομοίωσης

Τα περισσότερα μοντέλα που αναζητούν μία λύση του προβλήματος βασίζονται στις εκτιμήσεις οικονομικών αναλυτών για την οικονομική ζημία από το φαινόμενο του θερμοκηπίου (που ισοδυναμεί με τα οφέλη από τη μείωσή του), η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τις μεταβολές των τιμών αλλά και των παραγόμενων ποσοτήτων των διάφορων προϊόντων της κάθε εγχώριας οικονομίας, εξαιτίας της μεταβολής των εκπομπών GHG.

Ένα μοντέλο που κάνει εκτιμήσεις των οικονομικών ζημιών είναι αυτό των Fankhauser (1995) και Toll (1995), που λαμβάνει ως σημείο αναφοράς το σενάριο του 2 x CO_2, δηλαδή του διπλασιασμού της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα σε σχέση με την προ-βιομηχανική περίοδο (πριν από το 1970). Τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στο γράφημα 3.3 και περιγράφουν τις οικονομικές ζημίες για 135 διαφορετικά κράτη, ομαδοποιημένα σε γεωγραφικές περιφέρειες.



Γράφημα 3.3 Οικονομική ζημία των διάφορων περιφερειών στο 2 x CO_2 σενάριο (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002))

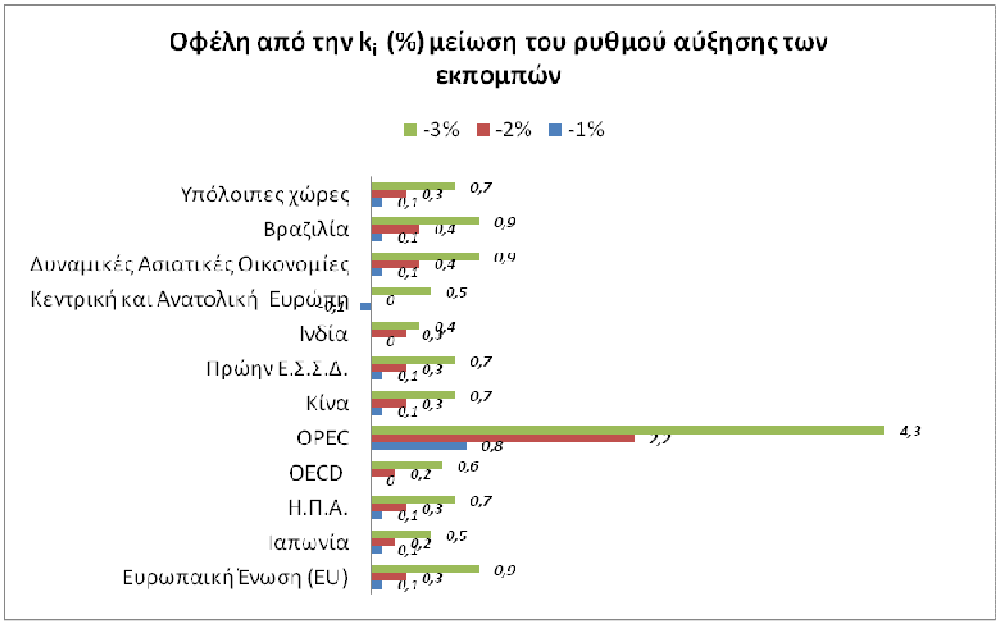
Φαίνεται ότι οι περιφέρειες που επηρεάζονται περισσότερο είναι είτε εκείνες που η βιομηχανική παραγωγή τους προκαλεί μεγάλα ποσά εκπομπής GHG, και δε διαθέτουν

εναλλακτικούς ενεργειακούς πόρους (Ασία, Λατινική Αμερική), είτε εκείνες που λόγω γεωγραφικής θέσης πλήττονται εντονότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες (Αφρική).

Ανάλογα μοντέλα μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου που εκτιμούν το κόστος ελάττωσης των εκπομπών είναι διαθέσιμα σχεδόν για όλες τις OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development) χώρες. Διακρίνονται στα τεχνολογικά προσανατολισμένα με δομή «από κάτω προς τα πάνω» (bottom up models) που επικεντρώνονται στη διαθεσιμότητα τεχνολογιών παροχής ενέργειας, και διαπιστώνουν μικρά οικονομικά οφέλη από τη μείωση των εκπομπών.

Στον αντίποδα υπάρχουν τα μοντέλα με δομή «από πάνω προς τα κάτω» (top down models) που επικεντρώνουν στην επίδραση που μπορεί να έχουν μία σειρά περιβαλλοντικών μέτρων, όπως η επιβολή προστίμων για την εκπομπή ανθρακικών αερίων. Αυτά προβλέπουν μεγαλύτερη οφέλη από τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα προηγούμενα.

Το μοντέλο που θα περιγραφεί στη συνέχεια αποτελεί μία εξέλιξη του OECD GREEN model, ενός "top down" μοντέλου που χρησιμοποίησαν πρώτοι οι Oliveira- Martins (1992). Παρουσιάζει τα οικονομικά οφέλη που θα υπήρχαν σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή στο μέλλον, από μία ελάττωση του ρυθμού αύξησης των εκπομπών GHG κατά 1%, 2%, 3% σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης που παρατηρείται στο "Business as usual" (BAU) σενάριο, ελλείψει δηλαδή οποιωνδήποτε μέτρων περιβαλλοντικής πολιτικής. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για το έτος 2000 στο γράφημα 3.4, αποτελεί μία ένδειξη του μοντέλου.



Γράφημα 3.4 Οφέλη (% Α.Ε.Π.) από την ποσοστιαία μείωση κατά 1, 2, 3% του ρυθμού αύξησης των εκπομπών (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002)).

3.2.1.2.3 Οριακό όφελος και συνάρτηση κόστους

Ο προσδιορισμός του βέλτιστου ποσού εκπομπών απαιτεί τον υπολογισμό του οριακού οφέλους και της συνάρτησης κόστους. Η βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί είτε με προσδιορισμό των αρχικών βέλτιστων εκπομπών σε ένα σημείο εκκίνησης $E(0)_i$, είτε με τον προσδιορισμό του βέλτιστου ρυθμού μεταβολής των εκπομπών κατά την πάροδο των ετών. Η βελτιστοποίηση με το δεύτερο τρόπο θα απαιτούσε μια δυναμική προσέγγιση της κατάστασης, καθώς κάθε χώρα μπορεί να αναπροσαρμόζει το ρυθμό εκπομπής της αναλόγως των εξελίξεων.

Έτσι για λόγους απλότητας θεωρείται ο ρυθμός αύξησης ως εξωγενής παράγοντας, και γίνεται υπολογισμός του βέλτιστου επιπέδου εκπομπών στο σημείο 0 (τέτοιο λαμβάνεται το έτος 1991). Τότε η εκπομπή GHG της χώρας i κατά τη χρονική στιγμή t στο μέλλον υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E(t)_i = E(0)_i \times e^{s_i t} \tag{3.1}$$

όπου $E(0)_i$ δείχνει το επίπεδο εκπομπών της χώρας i στο σημείο εκκίνησης 0.

Το επίπεδο συγκέντρωσης των GHG στην ατμόσφαιρα υπολογίζεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \sum_{i=1}^{n} p \times E(0)_i \times e^{s_i t} - \delta \times (C(t) - C_{pre}) \tag{3.2}$$

Σύμφωνα με αυτήν, η μεταβολή της συγκέντρωσης των GHG στην ατμόσφαιρα ισούται με το άθροισμα του ποσοστού των ανθρωπογενών εκπομπών που συσσωρεύεται στην ατμόσφαιρα από όλες τις χώρες, μείον τη φυσική απόσβεση του πλεονάζοντος ποσού συγκέντρωσης σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο C_{pre}. Η επίλυση της (3.2) δίνει τη συγκέντρωση των GHG τη χρονική στιγμή t :

$$C(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{p \times E(0)_i \times e^{t(s_i+\delta)}}{\delta + s_i} + C_{pre} + \frac{Z}{e^{\delta t}} \tag{3.3}$$

όπου η σταθερά Z μπορεί να υπολογιστεί από την (3.3) χρησιμοποιώντας τα σημερινά γνωστά επίπεδα συγκέντρωσης ($C(0) = C_{today}$).

Θεωρείται ότι οι απώλειες κάθε χώρας (περιβαλλοντική ζημία) ως ποσοστό του Α.Ε.Π. τη χρονική στιγμή t, εξαρτώνται τετραγωνικά από τη συγκέντρωση C δηλαδή:

$$L(t)_i = a_i + b_i \times C(t)^2 \tag{3.4}$$

όπου α_i και b_i παράμετροι που μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις τιμές του γραφήματος 3.3 για την περίπτωση του σεναρίου 2 x CO_2, και θεωρώντας την περιβαλλοντική ζημία μηδενική στην προβιομηχανική περίοδο. Τότε η μερική παράγωγος του αθροίσματος των συνεχώς μειούμενων με ρυθμό r περιβαλλοντικών ζημιών της χώρας i, για το χρονικό διάστημα από την t=0 μέχρι το τέλος της περιόδου προσομοίωσης, ως προς την $E(0)_i$, είναι:

$$D_i^{'} = \frac{\partial \int_{t=0}^{m} \left[(a_i + b_i \times (C(t))^2 \right] \times e^{-rt} dt}{\partial E(0)_i} \tag{3.5}$$

Λαμβάνοντας υπόψη και τις (3.3), (3.4) αποδεικνύεται ότι η ***συνάρτηση οριακής ζημίας (marginal damage function)*** για κάθε χώρα i, που ισοδυναμεί με τα οφέλη από την πιθανή μείωση των εκπομπών, είναι γραμμική συνάρτηση των αρχικών εκπομπών $E(0)_i$.

$$D_i^{'}(E(0)_i, E(0)_{-i}) = a_i + \sum_{j=1}^{n} \beta_{ij} \times E(0)_j \tag{3.6}$$

όπου α_i και β_{ij} αντιστοιχούν σε αλγεβρικές παραμέτρους ενώ το $E(0)_i$ αντιστοιχεί στο σύνολο των αρχικών εκπομπών (την t=0) όλων των υπόλοιπων χωρών του κόσμου.

Επί της ουσίας, αυτό που αποδεικνύουν οι δύο μελετητές είναι ότι ο ρυθμός μεταβολής των περιβαλλοντικών ζημιών της κάθε χώρας εξαρτάται γραμμικά, όχι μόνο από το επίπεδο των αρχικών εκπομπών της ιδίας, αλλά και από το σύνολο των αρχικών εκπομπών όλων των υπόλοιπων κρατών του κόσμου. Περιγράφουν δηλαδή μαθηματικά την παγκόσμια διάσταση του φαινομένου του θερμοκηπίου, αλλά και την ισχυρή αλληλεπίδραση που υπάρχει.

Αντίστοιχα τα οικονομικά οφέλη από τη μείωση του ρυθμού αύξησης των εκπομπών GHG, είναι δυνατό να εκφραστούν και αυτά ως συνάρτηση του αρχικού επιπέδου εκπομπών $E(0)_i$. Για το σκοπό αυτό πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των αρχικών εκπομπών $E(0)_i^I, E(0)_i^{II}, E(0)_i^{III}$ οι οποίες δίνουν μετά από m έτη (όσο και η περίοδος προσομοίωσης) το ίδιο επίπεδο συσσώρευσης ρύπων στην ατμόσφαιρα που θα υπήρχε αν ως αρχικό επίπεδο εκπομπών λαμβανόταν το $E(0)_i^{BAU}$ και ο ρυθμός αύξησης των εκπομπών μειωνόταν κατά 1%, 2% και 3% αντίστοιχα.

Αν λοιπόν ως Ω_i^t οριστεί το σύνολο των ρύπων στην ατμόσφαιρα που προκλήθηκε από τη χώρα i κατά τη χρονική περίοδο από 0 έως t, τότε ο ρυθμός μεταβολής αυτού θα ισούται με:

$$\frac{\partial \Omega_i(t)}{\partial t} = p \times E(0)_i \times e^{s_i t} - \delta \times \Omega_i(t) \tag{3.7}$$

δηλαδή με το ποσό των πραγματικών εκπομπών μείον το ποσό εκείνο που αποσβένεται φυσικά. Θεωρώντας και το απόθεμα των αερίων στην ατμόσφαιρα μηδενικό τη χρονική στιγμή t=0 (Ω_i (0) = 0), προκύπτει η εξίσωση :

$$\Omega_i(t) = \frac{\rho \times \mathrm{E}(0)_i \times e^{s_i t}}{s_i + \delta} - \frac{\rho \times \mathrm{E}(0)_i}{(s_i + \delta) \times e^{\delta t}} \tag{3.8}$$

Χρησιμοποιώντας την (3.8) είναι δυνατό να υπολογιστούν τα αρχικά επίπεδα εκπομπών $E(0)_i^I, E(0)_i^{II}, E(0)_i^{III}$. Για παράδειγμα το $E(0)_i^{II}$ μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\frac{\rho \times \mathrm{E}(0)_i^{BAU} \times e^{(s_i - 0.02)t}}{(s_i - 0.02) + \delta} - \frac{\rho \times \mathrm{E}(0)_i}{\left[(s_i - 0.02) + \delta)\right] \times e^{\delta t}} = \frac{\rho \times \mathrm{E}(0)_i^{II} \times e^{s_i t}}{s_i + \delta} - \frac{\rho \times \mathrm{E}(0)_i^{II}}{(s_i + \delta) \times e^{\delta t}} \tag{3.9}$$

Επίσης για κάθε ένα από τα τρία διαφορετικά επίπεδα αρχικών εκπομπών, είναι δυνατό να υπολογιστούν και τα αντίστοιχα κόστη $\mathrm{K}_i^I, \mathrm{K}_i^{II}, \mathrm{K}_i^{III}$ χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα ποσοστά κόστους $k_i^I, k_i^{II}, k_i^{III}$ του γραφήματος 3.2. Για παράδειγμα το K_i^{II} υπολογίζεται ως εξής :

$$K_i^{II} = \int_{t=0}^{m} y(0)_i \times e^{q_i t} \times k_i^{II} \times e^{-rt} dt \tag{3.10}$$

όπου $y(0)_i$ είναι το αρχικό Α.Ε.Π. της χώρας i.

Έτσι υπολογίζονται τα οριακά κόστη $\frac{K_i^{III} - K_i^{II}}{E(0)_i^{II} - E(0)_i^{III}}, \frac{K_i^{II} - K_i^{I}}{E(0)_i^{I} - E(0)_i^{II}}$, και, $\frac{K_i^I}{E(0)_i^{BAU} - E(0)_i^I}$. Με βάση αυτά, αλλά και τις ήδη γνωστές $E(0)_i^I, E(0)_i^{II}, E(0)_i^{III}$ μπορούν να προσδιοριστούν οι παράμετροι n_i, γ_i και λ_i της ακόλουθης ***συνάρτησης οριακού κόστους*** $K_i^{'}$ ***(marginal cost function):***

$$K_i^{'}(E(0)_i) = n_i + \gamma_i \ln(E(0)_i) + \lambda_i \left[\ln(E(0)_i)\right]^2, \forall 0 < E(0)_i < E(0)_i^{BAU} \tag{3.11}$$

με τον περιορισμό, το οριακό κόστος να είναι μηδενικό όταν οι εκπομπές είναι στα επίπεδα του σεναρίου Β.Α.U. ($K_i^{'}[E(0)_i^{BAU}] = 0$) και για εκπομπές μικρότερες αυτών του BAU η συνάρτηση οριακού κόστους να μην είναι αρνητική ($K_i^{''}[E(0)_i^{BAU}] = 0$). Δηλαδή το $E(0)_i^{BAU}$ αποτελεί σημείο τοπικού ακρότατου για την $K_i^{'}[E(0)_i]$.

Στη συνάρτηση οριακού κόστους περιλαμβάνεται και ο λογαριθμικός όρος για να εξασφαλίσει ότι το οριακό κόστος θα τείνει στο άπειρο όταν οι εκπομπές κάθε χώρας τείνουν να μηδενιστούν. Επίσης, επειδή με βάση τα εμπειρικά αποτελέσματα $\lambda_i \geq 0, \forall i$, σε μικρές μειώσεις του επιπέδου εκπομπών αντιστοιχούν μικρές αυξήσεις οριακού κόστους, ενώ για μεγάλο περιορισμό των εκπομπών παρατηρείται αλματώδης αύξηση του οριακού κόστους.

Με τον τρόπο αυτό και χρησιμοποιώντας τις παραπάνω συναρτήσεις υπολογίζονται οι οριακές ζημίες και τα οριακά κόστη, και στη συνέχεια τα βέλτιστα επίπεδα εκπομπών για καθεμία από τις 135 χώρες. Για τον καθορισμό αυτών, σημαντικό παράγοντα αποτελεί και η προσέγγιση που ακολουθείται σχετικά με το φαινόμενο και τις επιπτώσεις του όπως θα φανεί και στην επόμενη ενότητα.

3.2.1.3 Καθορισμός της βέλτιστης μείωσης των εκπομπών GHG

Στην ενότητα αυτή γίνεται προσδιορισμός των βέλτιστων εκπομπών για κάθε χώρα, λαμβάνοντας υπόψη τις συναρτήσεις οριακού κόστους και οριακής ζημίας, καθώς επίσης και την πολιτική στρατηγική που πρόκειται να ακολουθήσει η κάθε χώρα. Τα πιθανά σενάρια είναι τρία :

- Το ***βέλτιστο κατά Paretto σενάριο***, που όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια προκύπτει από την εξίσωση των συναρτήσεων οριακού κόστους και οριακής ζημίας της κάθε χώρας.
- Το ***σενάριο συμπεριφοράς Nash***, που προσδιορίζει το βέλτιστο επίπεδο εκπομπών για την κάθε χώρα, θεωρώντας ότι οι υπόλοιπες ακολουθούν το B.A.U. σενάριο.
- Το ***σενάριο ισορροπίας Nash***, όπου σε αντίθεση με το προηγούμενο, κάθε χώρα επιδιώκει τη βέλτιστο επίπεδο εκπομπών λαμβάνοντας όμως υπόψη ότι και οι υπόλοιπες χώρες ακολουθούν την ίδια στρατηγική.

Όπως θα φανεί ξεκάθαρα στη συνέχεια, όταν οι χώρες ακολουθούν το δεύτερο και το τρίτο σενάριο δε λαμβάνουν υπόψη τις συνέπειες που προκαλούν οι δικές τους εκπομπές στις υπόλοιπες χώρες. Για το λόγο αυτό καταλήγουν και σε μικρότερες μειώσεις των εκπομπών σε σχέση με το βέλτιστο κατά Paretto σενάριο. Πραγματοποιώντας μία σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραπάνω σεναρίων με αυτά του B.A.U. είναι δυνατό να αποσαφηνιστεί αν το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής λαμβάνει εθνικό ή διεθνή χαρακτήρα.

3.2.1.3.1 Το βέλτιστο κατά Paretto σενάριο

Το βέλτιστο κατά Paretto επίπεδο εκπομπών προκύπτει μεγιστοποιώντας το παγκόσμιο καθαρό όφελος Π, που ισούται με το άθροισμα του καθαρού οφέλους της κάθε χώρας π_i :

$$\max_{E(0)_1,\ldots,E(0)_n} \Pi = \sum_{i=1}^{n} \pi_i \text{ , όπου } \pi_i = K_i(E(0)_i) - D_i(E(0)_i, E(0)_{-i}) \tag{3.12}$$

Το καθαρό όφελος της κάθε χώρας προκύπτει από τη διαφορά του κόστους της κάθε χώρας $K_i\,[E(0)_i]$ και της ζημίας $D_i(E(0)_i, E(0)_{-i})$.

Καθώς ο ρυθμός αύξησης των εκπομπών s_i είναι διαφορετικός για την κάθε χώρα, συνεπάγεται ότι μία αλλαγή των αρχικών εκπομπών $E(0)_i$ θα επηρεάζει περισσότερο ή λιγότερο την ατμοσφαιρική συγκέντρωση GHG, ανάλογα με τη χώρα που προέβη στην αλλαγή. Έτσι, το βέλτιστο κατά Paretto επίπεδο μείωσης των εκπομπών προσδιορίζεται εξισώνοντας το οριακό κόστος με το άθροισμα των μερικών παραγώγων των οριακών ζημιών ως προς $E(0)_i$:

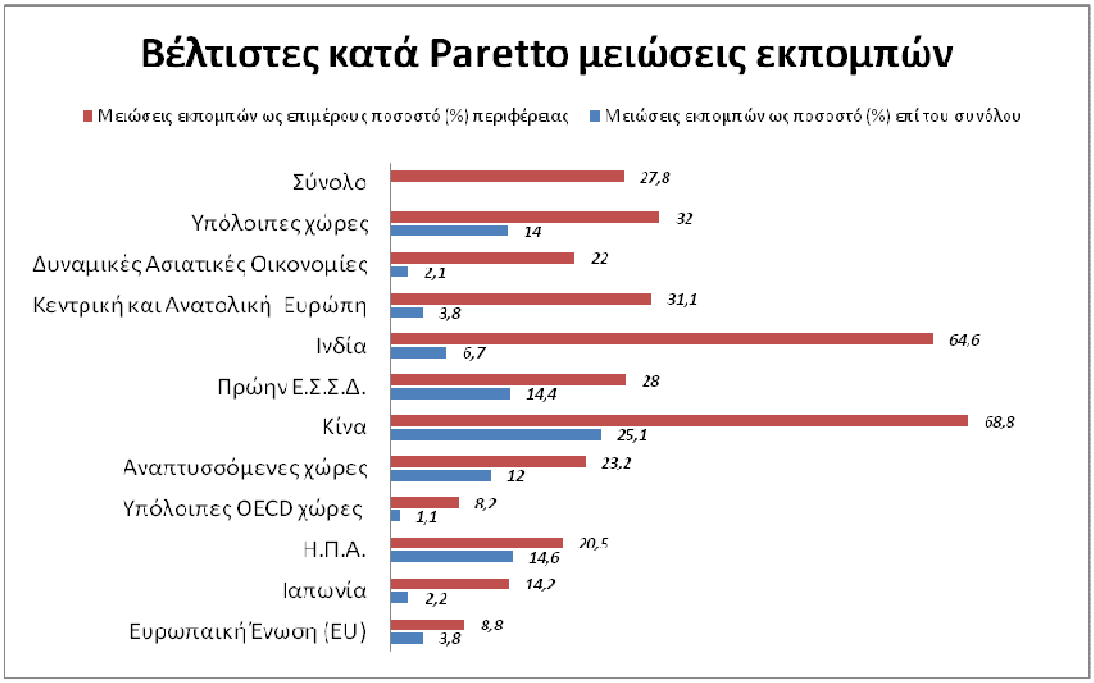
$$K_i^{'}(E(0)_i) = \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial D_j(E(0)_1,\ldots,E(0)_n)}{\partial E(0)_i}, \forall i \tag{3.13}$$

Είναι λοιπόν αντιληπτό ότι και στη βέλτιστη κατάσταση το οριακό κόστος δε θα είναι το ίδιο για όλες τις χώρες, όπως θα έπρεπε να είναι στην περίπτωση ενός αμιγώς κοινού καλού. Σε αντίθεση μάλιστα με την υπάρχουσα τάση που υπαγορεύει ότι προς όφελος του κοινού καλού οι εκπομπές πρέπει να μειώνονται περισσότερο σε εκείνες τις χώρες όπου κάθε πρόσθετη μείωση έχει τη μικρότερη επίδραση στο Α.Ε.Π. της χώρας, το μοντέλο δείχνει ότι σημαντικό παράγοντα αποτελεί και ο τρέχων ρυθμός αύξησης των εκπομπών της κάθε χώρας.

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων μειώσεων έγινε επίλυση ενός μη-γραμμικού συστήματος 135 μεταβλητών. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, που παρατίθενται στο γράφημα 3.5 ανά γεωγραφική περιφέρεια, προτείνουν μείωση των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών κατά 27,8% σε σχέση με τις υπάρχουσες.

Από μία πρώτη ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται φανερό ότι, με εξαίρεση τις Η.Π.Α., το μεγάλο βάρος πέφτει στις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες (Κίνα, Ινδία, Υπόλοιπες χώρες, κ.α.) γεγονός που οπωσδήποτε εγείρει ζήτημα ισότητας. Το αποτέλεσμα αυτό δεν επιβεβαιώνεται μόνο από την επιμέρους ποσοστιαία μείωση, αλλά και από τη συνολική. Αυτή η ανισοκατανομή οφείλεται σε μεγάλο βαθμό και στο γεγονός ότι οι οικονομίες των

λιγότερο αναπτυγμένων ή αναπτυσσόμενων χωρών δε διαθέτουν εναλλακτικούς ενεργειακούς πόρους και βασίζουν την παραγωγή τους κυρίως σε παράγωγα του άνθρακα.



Γράφημα 3.5 Μειώσεις εκπομπών σύμφωνα με το βέλτιστο κατά Paretto σενάριο (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002))

3.2.1.3.2 Το σενάριο Nash

Στη σημερινή πραγματικότητα οι περισσότερες χώρες αρνούνται να προβούν σε μονομερείς μειώσεις των εκπομπών τους, γνωρίζοντας ότι οι υπόλοιπες θα διατηρήσουν τα υπάρχοντα επίπεδα εκπομπών. Ο βασικότερος λόγος που επικαλούνται είναι ότι θα υποστούν οικονομική ζημία.

Η παραπάνω αιτίαση αποτέλεσε την αφορμή για την ανάπτυξη του σεναρίου Nash. Στην περίπτωση αυτή αναζητείται η βέλτιστη μείωση εκπομπών για κάθε χώρα ξεχωριστά, θεωρώντας ότι τα υπόλοιπα κράτη διατηρούν τις εκπομπές τους σταθερές στο επίπεδο του B.A.U..Μαθηματικά το πρόβλημα διαμορφώνεται ως εξής:

$$\max_{E(0)_i} \pi_i = K_i\,(E(0)_i) - D_i(E(0)_i, E(0)_{-i}^{BAU}) \tag{3.14}$$

Αν η μείωση των εκπομπών σε σχέση με το B.A.U. είναι οικονομικά συμφέρουσα, ή όχι, για την κάθε χώρα, εξαρτάται αποκλειστικά από τις ατομικές συναρτήσεις οριακού

κόστους και ζημιών. Αν το υπάρχον οριακό κόστος είναι μικρότερο από την υπάρχουσα οριακή ζημία, τότε ασφαλώς και υπάρχει κίνητρο μονομερούς μείωσης των εκπομπών.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο γράφημα 3.6, με αύξουσα σειρά, ξεκινώντας από τα κράτη που πρέπει να πραγματοποιήσουν τις μικρότερες μειώσεις στις εκπομπές τους και καταλήγοντας σε εκείνα με τις μεγαλύτερες.

Ιδιαίτερα οι αναπτυσσόμενες χώρες πρέπει να μειώσουν κατά πολύ τις εκπομπές GHG, ώστε να πετύχουν μια ικανοποιητική κατανομή μεταξύ των διάφορων αξιοποιήσιμων ενεργειακών πόρων. Για παράδειγμα η Κίνα παρουσιάζει ένα πολύ υψηλό ποσοστό μειώσεως των εκπομπών της (66,7%), και ακολουθούν η Ινδία (65,9%), οι Φιλιππίνες (28,1%), και η πρώην ΕΣΣΔ (27,1%). Με εξαίρεση τις Η.Π.Α. (22,1%), για τις υπόλοιπες αναπτυγμένες χώρες η στρατηγική του σεναρίου B.A.U. βρίσκεται πολύ κοντά με τη στρατηγική ατομικής βελτιστοποίησης (σενάριο Nash).

Όπως λοιπόν και στην ανάλυση του προηγούμενου σεναρίου, έτσι και εδώ γίνεται φανερή μια συγκεκριμένη τάση. Η ύπαρξη εναλλακτικών ενεργειακών πόρων, εξασφαλίζει μεγαλύτερα οφέλη από τη μείωση των εκπομπών GHG για τις αναπτυγμένες χώρες, ενώ οι αναπτυσσόμενες χώρες παρουσιάζουν μεγαλύτερες ζημίες λόγω της κλιματικής αλλαγής.

Γράφημα 3.6 Μειώσεις εκπομπών στο σενάριο Nash (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002))

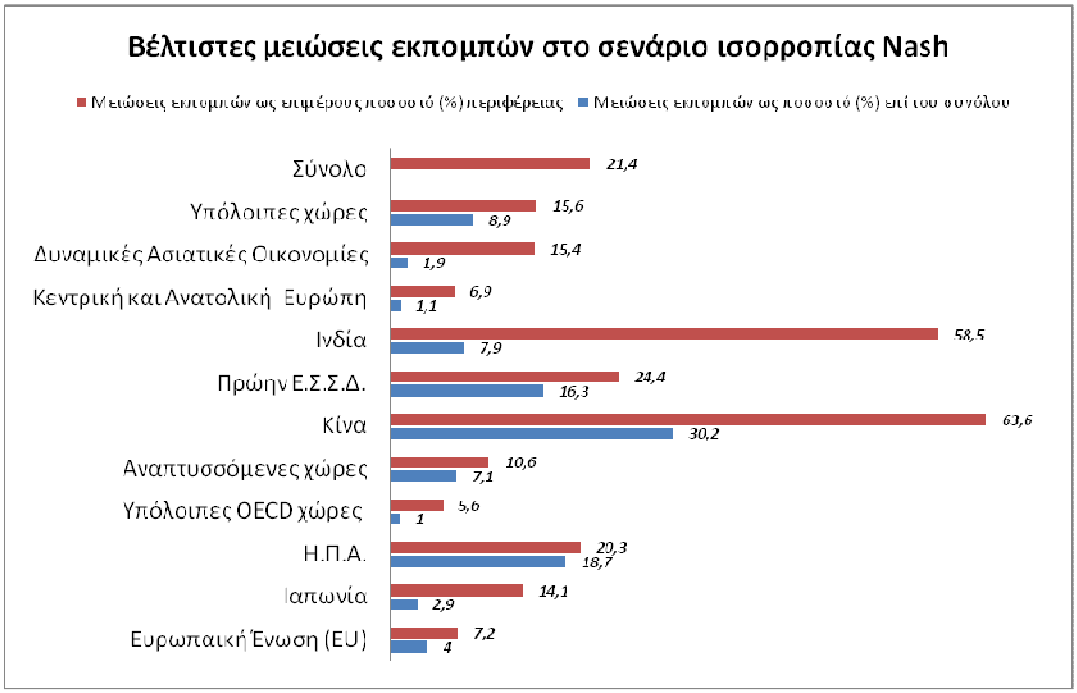
3.2.1.3.3 Το σενάριο ισορροπίας Nash

Στην περίπτωση αυτή αναζητείται το βέλτιστο ατομικό επίπεδο εκπομπών κάθε χώρας, θεωρώντας όμως αυτή τη φόρα ότι και οι υπόλοιπες χώρες πράττουν το ίδιο και δε διατηρούν τις εκπομπές τους σταθερές, όπως συνέβαινε στο προηγούμενο σενάριο. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται ως εξής:

$$\max_{E(0)_i} \pi_i = K_i\,(E(0)_i) - D_i(E(0)_i, E(0)_{-i}), \forall i \qquad (3.15)$$

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά του γραφήματος 3.5, που αφορούν το βέλτιστο κατά Paretto σενάριο, διαπιστώνεται ότι οι προτεινόμενες μειώσεις εκπομπών είναι μικρότερες στην περίπτωση ισορροπίας Nash. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά τον προσδιορισμό των μειώσεων των εκπομπών τους σύμφωνα με το τελευταίο σενάριο, οι χώρες δε λαμβάνουν υπόψη τα οφέλη που αποκομίζουν τα υπόλοιπα κράτη. Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα προσομοίωσης είναι αρκετά όμοια με αυτά του σεναρίου Nash.

Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα το βέλτιστο κατά Paretto σενάριο προτείνει μία συνολική μείωση 27,8 % σε σχέση με τις υπάρχουσες εκπομπές. Αντίθετα το σενάριο ισορροπίας Nash υπαγορεύει συνολικές μειώσεις 21,4 %. Αποδεικνύεται λοιπόν ότι το πρόβλημα μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, όπως φαίνεται στο γράφημα 3.7.

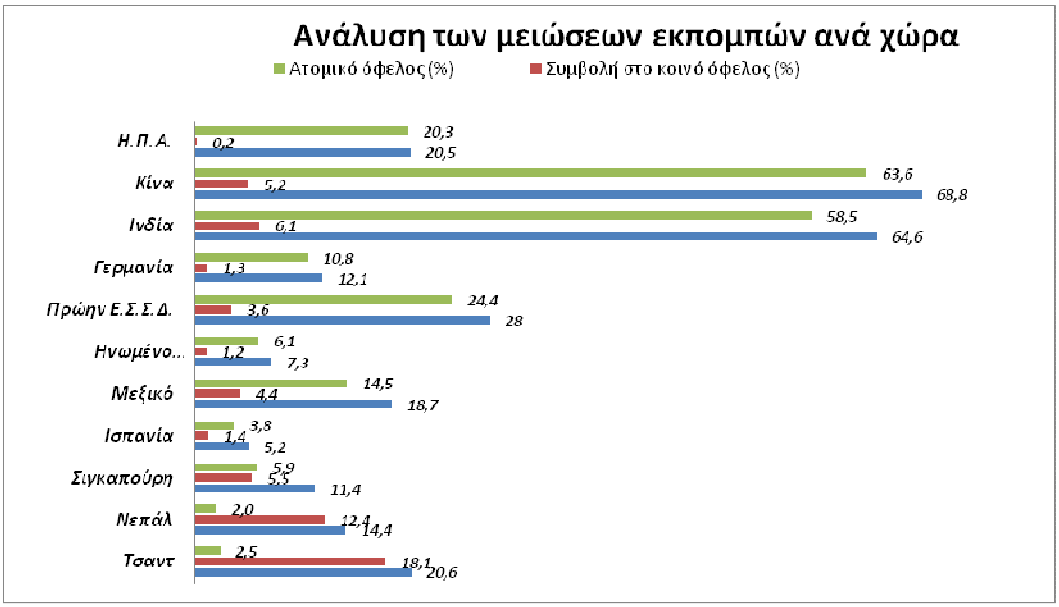


Γράφημα 3.7 Μειώσεις εκπομπών στο σενάριο ισορροπίας Nash (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002))

Ενώ το 21,4 % καταδεικνύει την απροθυμία των χωρών να ισοσταθμίσουν τα οριακά κόστη και τις οριακές ζημίες τους, το υπόλοιπο 6,4 % αναφέρεται στο διεθνή χαρακτήρα του προβλήματος. Μια σύγκριση των δύο ποσοστών κάνει φανερό ότι πρόκειται κυρίως για ένα εθνικό πρόβλημα των κρατών, και ως τέτοιο πρέπει να αντιμετωπιστεί..

Από μία καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων των γραφημάτων 3.5 και 3.7, διαπιστώνουμε ότι σε άλλες χώρες είναι περισσότερο και σε άλλες λιγότερο ισχυρή η διεθνής συνιστώσα των μειώσεων. Προκειμένου να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης για κάποια κράτη διάφορων επιπέδων οικονομικής ισχύος και ανάπτυξης.

Στο γράφημα 3.8 η μπλε ράβδος δείχνει τις βέλτιστες κατά Paretto ποσοστιαίες μειώσεις εκπομπών ανά χώρα η κόκκινη το ποσοστό εκείνο που αντιστοιχεί στην εξυπηρέτηση του κοινού καλού $(E_i^{Paretto} - E_i^{NashEq.})\%$, και η πράσινη το ποσοστό που αντιστοιχεί στο ατομικό όφελος της κάθε χώρας και προκύπτει από το σενάριο ισορροπίας Nash $(E_i^{NashEq.})\%$.



Γράφημα 3.8 Εθνική και διεθνής συνιστώσα των μειώσεων εκπομπών των κρατών (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002))

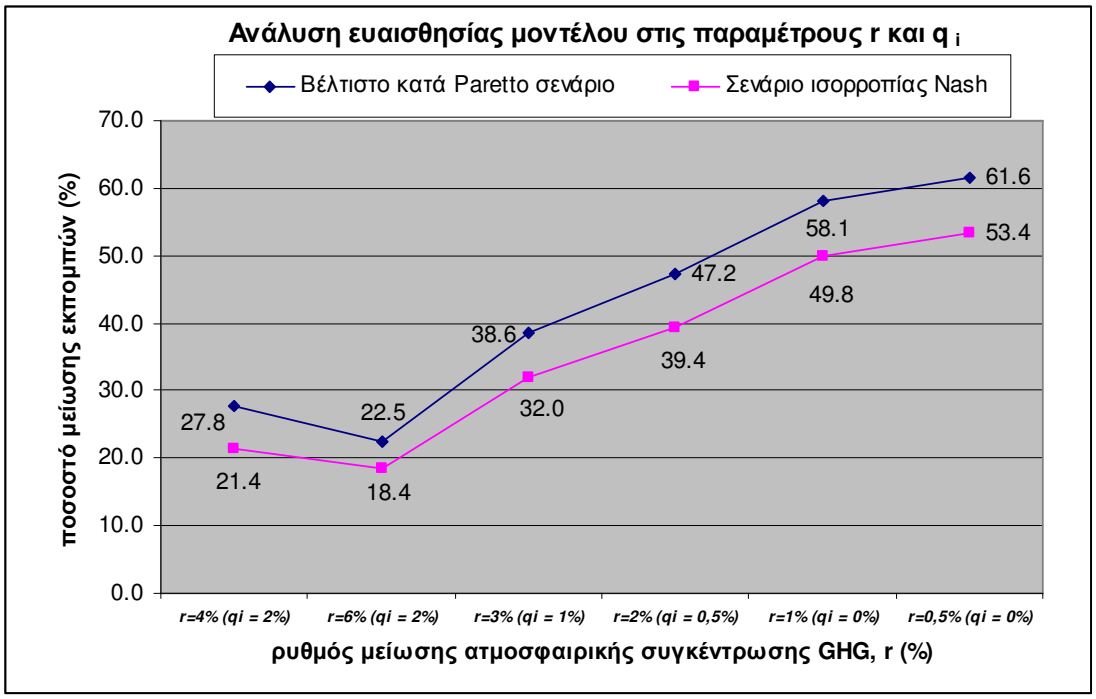
Υπάρχει μία σειρά αναπτυσσόμενων και λιγότερο αναπτυγμένων κρατών (Τσαντ, Νεπάλ, Σιγκαπούρη), όπου ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των μικρών μειώσεων των εκπομπών τους αφιερώνεται στο κοινό καλό ενώ το ατομικό όφελος των ίδιων των κρατών είναι ελάχιστο.

Στον αντίποδα οι μεγαλύτερες χώρες (Κίνα, Ινδία), οι οποίες συνεισφέρουν αποφασιστικά στην παγκόσμια ατμοσφαιρική συσσώρευση των αερίων του θερμοκηπίου, πρέπει να προβούν σε μεγάλες μειώσεις των εκπομπών τους, οι οποίες όμως αποσκοπούν σε πολύ μεγάλο ποσοστό στο ατομικό τους όφελος και όχι στο κοινό καλό.

Για μία ακόμη φορά καταδεικνύεται ο εθνικός χαρακτήρας του φαινομένου του θερμοκηπίου και τίθεται σε αμφισβήτηση η πολιτική που υπαγορεύει μία παγκόσμια αντιμετώπιση του προβλήματος προς όφελος του κοινού καλού. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, όλα τα κράτη πρέπει να αναγάγουν το πρόβλημα στα πλαίσια της εθνικής τους οικονομίας και να συνειδητοποιήσουν τα οικονομικά οφέλη που τους προσφέρει μια ικανοποιητική μείωση των εκπομπών τους σε GHG. Σε αυτό το σκοπό πρέπει να συμβάλλουν και οι διάφορες περιβαλλοντικές οργανώσεις και φορείς.

3.2.1.4 Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου

Με δεδομένη τη γενικότερη αστάθεια και μεταβλητότητα που χαρακτηρίζει την πολιτική γύρω από το φαινόμενο του θερμοκηπίου, έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί η συμπεριφορά του μοντέλου στην περίπτωση αλλαγής βασικών παραμέτρων όπως ο ρυθμός μείωσης της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης των GHG r, ο ρυθμός αύξησης του Α.Ε.Π. q_i , και, η περίοδος προσομοίωσης m.

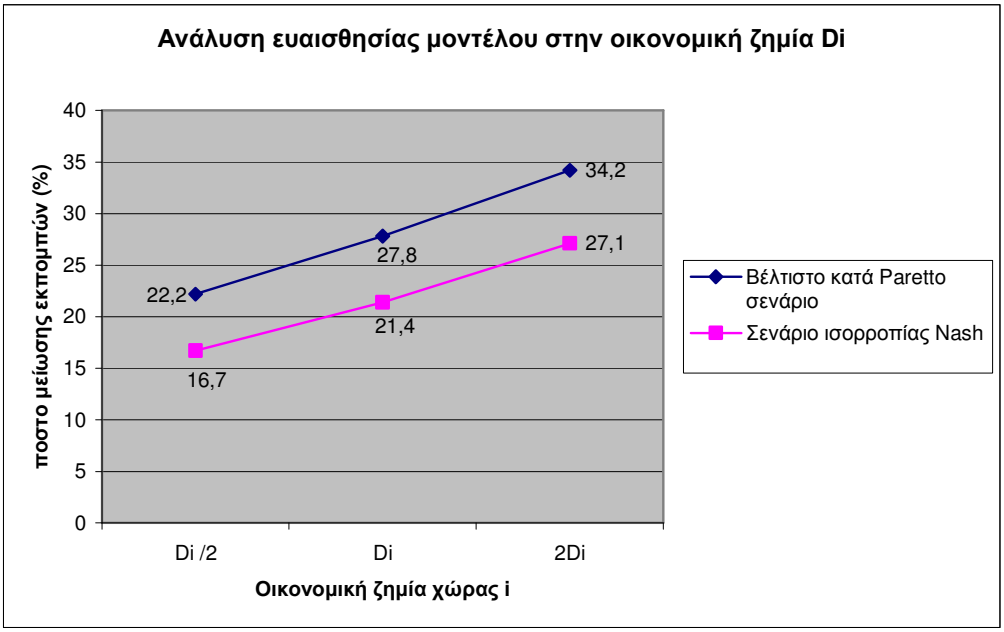


Γράφημα 3.9 Μεταβολή των παραμέτρων r και q_i (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002))

Από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου στις παραμέτρους r και q_i που παρουσιάζεται στο γράφημα 3.9, γίνεται φανερή η ευαισθησία του μοντέλου σε αυτές. Η ελάττωση του r από το 6% στο 0,5% προκαλεί υπερδιπλασιασμό των απαιτούμενων κατά Paretto μειώσεων των εκπομπών των GHG. Το παραπάνω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, καθώς κάθε ελάττωση του ρυθμού μείωσης της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης των GHG αποτελεί ένδειξη λήψης πρόσθετων μέτρων, δηλαδή μεγαλύτερης μείωσης των εκπομπών. Αυτό που προκαλεί εντύπωση είναι το μέγεθος της απαιτούμενης μείωσης ($\Delta E_{Paretto}$ = 39,1%, $\Delta E_{Nash\ Eq.}$ = 35 %).

Υπολογίσιμη είναι και η ευαισθησία του μοντέλου στην παράμετρο q_i , καθώς ο υποδιπλασιασμός του r με μείωση του q_i (από 0,5 % σε 0%) προκαλεί μεγάλη αύξηση των απαιτούμενων κατά Paretto μειώσεων εκπομπών σε σχέση με αυτές που παρατηρούνται όταν το q_i διατηρείται αμετάβλητο ($\Delta E_{Paretto.1}$ = 10,9 % έναντι $\Delta E_{Paretto.2}$ = 3,4 %).

Στο γράφημα 3.10 εξετάζεται η επίδραση των οικονομικών ζημιών λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων, και διαπιστώνεται ότι το μοντέλο είναι πολύ ανθεκτικό σε αυτήν την παράμετρο. Διπλασιασμός της οικονομικής ζημίας προκαλεί περαιτέρω μείωση των βέλτιστων κατά Paretto εκπομπών μόλις κατά 6,4 %, ενώ ο υποδιπλασιασμός της προκαλεί αύξηση του ποσοστού των εκπομπών κατά 5,6 % .



Γράφημα 3.10 Ανάλυση ευαισθησίας μοντέλου στην οικονομική ζημία D_i (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002))

Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής του χρονικού ορίζοντα στο μοντέλο, όπου μία μείωση 25% της περιόδου προσομοίωσης (από 200 σε 150 έτη) προκάλεσε ελάττωση του ποσοστού μείωσης των εκπομπών κατά περίπου 27 % (από 27,8 % σε 20,2 % οι βέλτιστες κατά Paretto, και, από 21,4 % σε 15,3 % σύμφωνα με το σενάριο ισορροπίας Nash).

Με εξαίρεση λοιπόν την ισχυρή επίδραση του ρυθμού μείωσης της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης των GHG r, η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε μία ανθεκτικότητα του μοντέλου στη μεταβολή βασικών του παραμέτρων. Μάλιστα όλες οι αλλαγές κινήθηκαν προς την αναμενόμενη κατεύθυνση. Ταυτόχρονα, η αναλογία της εθνικής προς τη διεθνή συνιστώσα των μειώσεων, ή αλλιώς ο λόγος $\left[\frac{E_{NashEq.}}{E_{Paretto}}\right]$ έμεινε σταθερός και ανεπηρέαστος από τις μεταβολές.

3.2.1.5 Δημιουργία Συμμαχιών

Στην ενότητα αυτή θα εξεταστεί η πιθανή δημιουργία συμμαχιών μεταξύ των εξεταζόμενων κρατών για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Στις προσομοιώσεις που θα γίνουν θα υπολογιστούν τα οφέλη και οι ζημίες για τις διάφορες συμμαχίες με οικονομική συσχέτιση (cooperative coalitions), και χωρίς οικονομική συσχέτιση (non-cooperative coalitions). Θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καθώς και επεξήγησή τους,

Οι πιθανοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από συνθήκες εσωτερικής και εξωτερικής σταθερότητας. Μία συμμαχία είναι ισχυρή όταν ικανοποιεί τις συνθήκες εσωτερικής αλλά και εξωτερικής σταθερότητας, ενώ είναι ασθενής όταν καλύπτει μόνο τη συνθήκη εσωτερικής σταθερότητας.

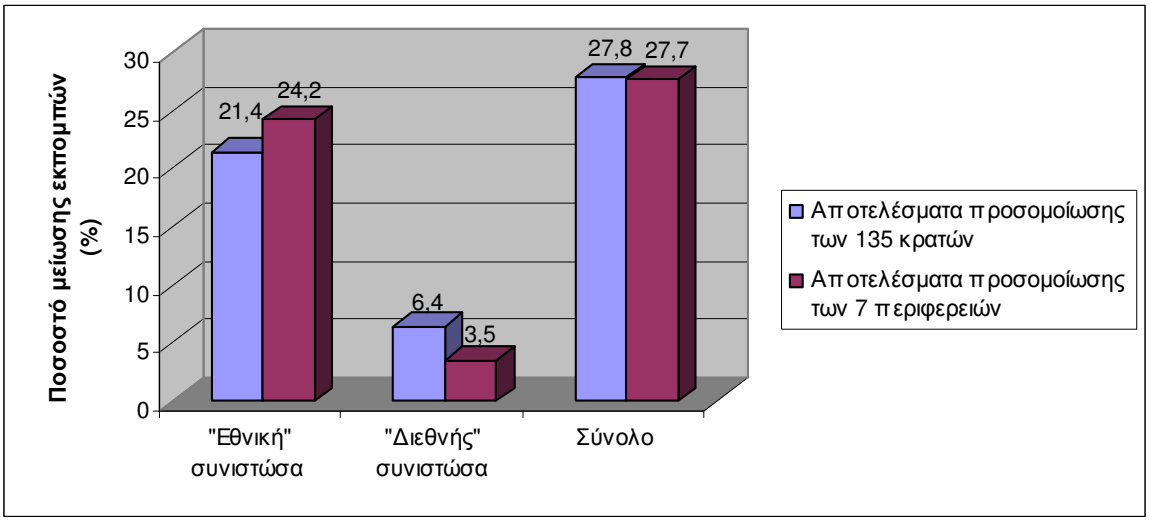
Η εσωτερική σταθερότητα ισχύει όταν κανένα μέλος της συμμαχίας δεν επωφελείται αν την εγκαταλείψει, ενώ η συνθήκη εξωτερικής σταθερότητα απαιτεί ότι καμία τρίτη χώρα δεν επιθυμεί να εισέλθει στη συμμαχία.

Μία ισχυρή συμμαχία μπορεί να αποκλείσει κάποιες επιπόλαιες κινήσεις των χωρών, όπως η επόμενη. Μία τρίτη χώρα Α, μη-μέλος, επιθυμεί να εισέλθει στη συμμαχία προσδοκώντας σε αυξημένο όφελος από την επιλογή της. Μία χώρα-μέλος Β φοβούμενη πιθανή μείωση των κερδών της από αυτήν τη νέα κατάσταση, αποφασίζει να αποσχιστεί και

αυτό οδηγεί σε διάλυση της συμμαχίας. Τελικά και η χώρα Α περιέρχεται σε χειρότερη κατάσταση από αυτή που βρισκόταν αρχικά.

Γενικά, όπως αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η δημιουργία σταθερών συμμαχιών δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη υπόθεση κυρίως γιατί η πιθανή είσοδος ενός νέου μέλους συχνά αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα .

Οι 135 χώρες που μελετήθηκαν μπορούν να σχηματίσουν 4,3 x 10^{40} πιθανές συμμαχίες. Η προσομοίωση αυτών είναι αδύνατη, και γι' αυτό το λόγο τα κράτη χωρίζονται σε επτά διαφορετικές περιφέρειες, για τις οποίες υπολογίζονται οι βέλτιστες κατά Paretto εκπομπές και οι εκπομπές ισορροπίας Nash. Οι περιφέρειες αυτές είναι οι Η.Π.Α., η Ευρωπαϊκή Ένωση, οι υπόλοιπες OECD χώρες συμπεριλαμβανομένης της Ιαπωνίας, η πρώην Ε.Σ.Σ.Δ. και οι χώρες της ανατολικής Ευρώπης, η Κίνα και η Ινδία, οι λιγότερο αναπτυγμένες χώρες, και, οι υπόλοιπες χώρες του κόσμου. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατίθενται στο γράφημα 3.11.



Γράφημα 3.11 «Διεθνής» και «εθνική» συνιστώσα των μειώσεων των εκπομπών των περιφερειών (Πηγή : Hackl, Pruckner (2002))

Είναι λοιπόν φανερό ότι η «διεθνής» συνιστώσα μειώνεται από 6,4% στην περίπτωση των ανεξάρτητων μειώσεων εκπομπών των 135 κρατών, σε 3,5% στην περίπτωση των μειώσεων υπό μορφή περιφερειών. Η παραπάνω διαφορά των 2,9 ποσοστιαίων μονάδων προστίθεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στα ίδια οφέλη των κρατών, και τελικά η «εθνική» συνιστώσα αυξάνεται κατά 2,8%.

Για τις 121 διαφορετικές συμμαχίες τόσο με, όσο και χωρίς, οικονομική συσχέτιση που μπορούν να σχηματιστούν από τις 7 περιφέρειες έγινε προσομοίωση και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Μόλις μία ισχυρή συμμαχία βρέθηκε η οποία διαμορφώνεται χωρίς οικονομική συσχέτιση μεταξύ των δύο περιφερειών. Αυτή διαμορφώνεται ανάμεσα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τις υπόλοιπες OECD χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ιαπωνίας. Το αδύνατο σημείο αυτής είναι ότι μειώνει ελάχιστα τη διεθνή συνιστώσα των μειώσεων των εκπομπών, μόλις κατά 0,72% (από 3,46% σε 3,44%).

Επιπλέον είναι δυνατό να σχηματιστούν οι παρακάτω τρεις ασθενείς συμμαχίες, όπου στην παρένθεση αναγράφεται το ποσοστό κατά το οποίο μειώνεται η «διεθνής» προς όφελος της «εθνικής» συνιστώσας. Αυτές είναι οι Η.Π.Α. με τις «υπόλοιπες χώρες» (4,24%), η Ευρωπαϊκή Ένωση με τις «υπόλοιπες χώρες» (2,14%), και τέλος, οι Η.Π.Α. με την Ευρωπαϊκή Ένωση (1,5%). Το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι οι άλλες περιφέρειες έχουν κίνητρο να προσχωρήσουν στις συμμαχίες, γεγονός που τελικά μπορεί να οδηγήσει στην κατάρρευσή των αρχικών σχηματισμών.

Διαπιστώθηκε επίσης ότι μπορούν να σχηματιστούν δύο ισχυρές συμμαχίες με οικονομική συσχέτιση. Αυτές είναι της «Ινδίας και της Κίνας» με τις «λιγότερο αναπτυγμένες χώρες», και, της «Ινδίας και της Κίνας» με τις «υπόλοιπες χώρες». Στην πρώτη περίπτωση η «διεθνής» συνιστώσα μειώνεται κατά 12,5% και στη δεύτερη κατά 14%. Το παράδοξο ωστόσο είναι ότι παρατηρώντας τις χρηματοροές μεταξύ των μελών, διαπιστώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις η «Ινδία και η Κίνα» πληρώνονται από τους οικονομικά αδύναμους συμμάχους τους!

Αντίστοιχα είναι δυνατό να σχηματιστούν και πολλές ασθενείς συμμαχίες με οικονομική συσχέτιση, των οποίων όμως ο μέγιστος αριθμός μελών είναι δύο. Τα ποσοστά μείωσης των εκπομπών τους που διατίθενται προς όφελος του κοινού καλού κυμαίνονται από 0,7% έως 11,2%.

Εύκολα λοιπόν γίνεται αντιληπτό ότι είναι σχεδόν απίθανη η σύναψη συμμαχιών για την κοινή αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου, χωρίς οικονομικές ανταλλαγές μεταξύ των μελών τους. Ακόμα και αυτές που είναι πιθανό να σχηματιστούν είναι ολιγομελείς και δεν απαρτίζονται απαραίτητα από εκείνες τις περιφέρειες που μπορούν να εγγυηθούν ικανοποιητικές μειώσεις εκπομπών σε συνολικό επίπεδο. Η κατάσταση αυτή μπορεί να αλλάξει μόνο αν οι ιθύνοντες των χωρών αλλάξουν στάση και αξιολογήσουν τις ευεργετικές συνέπειες της μείωσης των εκπομπών με μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα. Τότε

μόνο είναι πιθανό να δημιουργηθούν και συνασπισμοί, χωρίς οικονομικές εξαρτήσεις των κρατών-μελών. Κάτι τέτοιο ωστόσο δε φαντάζει πολύ πιθανό στο άμεσο μέλλον.

Αντίθετα η οικονομική αλληλεγγύη μεταξύ των κρατών, αποφέρει σημαντικότερες μειώσεις εκπομπών. Κυρίαρχο ωστόσο ρόλο παίζει η κατεύθυνση ων χρηματοροών εντός της συμμαχίας. Και φαντάζει εξαιρετικά δύσκολο να διατηρηθούν συμμαχίες στις οποίες οι φτωχές χώρες πρέπει να αποζημιώνουν τις πλουσιότερες. Όπως ωστόσο έδειξαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ο πιο σταθερός σχηματισμός, από άποψη αποδοτικών μειώσεων εκπομπών, ήταν ανάμεσα σε φτωχές περιφέρειες και τη βιομηχανικά αναπτυγμένη περιφέρεια της «Ινδίας και της Κίνας».

Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι πρέπει να υπάρξει μία σφαιρικότερη αντιμετώπιση του προβλήματος και μία επέκταση των κριτήριων δημιουργίας μιας συμμαχίας. Προφανώς για τους πολιτικούς παράγοντες μιας λιγότερο αναπτυγμένης χώρας, κυρίαρχο κριτήριο για τη δημιουργία μιας συμμαχίας δε μπορεί να αποτελέσει η σημαντική μείωση των εκπομπών, όταν αυτή θα συνοδεύεται από έναν άδικο επιμερισμό των οικονομικών φορτίων.

Στο τραπέζι των διαπραγματεύσεων θα πρέπει να τεθούν και ζητήματα όπως η στήριξη των αναπτυσσόμενων χωρών, η μείωση του διεθνούς χρέους των χωρών του «τρίτου κόσμου», ο περιορισμός των τελωνειακών δασμών από τις αναπτυγμένες χώρες με σκοπό την αύξηση της εξαγωγικής δραστηριότητας των αναπτυσσόμενων χωρών. Σε αυτήν την κατεύθυνση μπορεί να συνεισφέρει η επέκταση των αρμοδιοτήτων του UNFCCC, του διεθνούς φορέα που έχει συσταθεί για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών του πλανήτη.

3.2.2 "Sticks and carrots for the design of international climate agreements with renegotiations", Hans-Peter Weikard, Rob Dellink (2010)

Στην προηγούμενη εργασία των Franz Hackl, Gerard J. Pruckner (2002) η στρατηγική των χωρών αναλύθηκε με βάση τη βελτιστοποίηση χαρακτηριστικών οικονομικών μεγεθών, αλλά και την ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών GHG για την κάθε χώρα. Το μοντέλο ήταν στατικό, καθώς ως μεταβλητή απόφασης είχε θεωρηθεί το επίπεδο των αρχικών εκπομπών E_i^0, το οποίο και παρέμενε σταθερό κατά την περίοδο προσομοίωσης.

Στην πράξη ωστόσο τα πράγματα είναι τελείως διαφορετικά. Οι χώρες αναπροσαρμόζουν και επαναδιαπραγματεύονται τους ρυθμούς μείωσης και τα επίπεδα των εκπομπών τους σε τακτά χρονικά διαστήματα, ενώ παράλληλα μπορούν να ανταλλάσουν δικαιώματα εκπομπών αλλά και μέρος των κερδών τους με άλλα, λιγότερο ρυπογόνα μέλη της συμμαχίας τους. Κυρίως όμως υπάρχουν και πορεύονται σε ένα δυναμικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης, το οποίο προσπαθούν να περιγράψουν και να αναλύσουν οι Hans-Peter Weikard, Rob Dellink (2010) στα πλαίσια του δημοσιευμένου άρθρου τους.

3.2.2.1 Εισαγωγή

Η αποδοτική διαχείριση ενός κοινού αγαθού, όπως η σταθεροποίηση των κλιματικών αλλαγών και η διατήρηση της βιοποικιλότητας απαιτούν μια παγκόσμια υπερ-συμμαχία (grand coalition) των κρατών, που θα είναι υπεύθυνη για την περιβαλλοντική διαχείριση και νομοθεσία. Όπως όμως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η σταθερότητα μιας τέτοιας συμμαχίας είναι αμφίβολη καθώς τα μέλη της έχουν κίνητρα διαφοροποίησης. Σε αυτό το επιστημονικό άρθρο εξετάζονται οι δυνατότητες δημιουργίας μιας σταθερής *διεθνούς κλιματολογικής συμφωνίας (international climate agreement-ICA),*που θα πλησιάζει αρκετά τη βέλτιστη, πλην όμως ασταθή, παγκόσμια οικονομική συμμαχία.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτά ο ορισμός της έννοιας σταθερότητα. Οι συγγραφείς τη διακρίνουν σε εσωτερική και εξωτερική σταθερότητα. ***Μία συμμαχία θεωρείται σταθερή αν και μόνο αν κανένα από τα μέλη της δεν έχει κίνητρο να την εγκαταλείψει (εσωτερική σταθερότητα), και κανένα μη-μέλος δεν έχει όφελος να προσχωρήσει σε αυτή (εξωτερική σταθερότητα)***. Ο ορισμός αυτός αναφέρεται σε συμμαχίες που αφορούν μία μόνο χρονική περίοδο δέσμευσης. Θα χρειαστεί διεύρυνση του ορισμού σε επόμενη ενότητα ώστε να συμπεριλάβει και τη δημιουργία μιας ακολουθίας συμμαχιών, έπειτα από την εισαγωγή του στοιχείου των επαναδιαπραγματεύσεων.

Για τη δημιουργία μιας συμμαχίας θεωρείται ότι τα μέλη της συνάπτουν μια αμοιβαία συμφωνία, και δεν υπάρχει κανενός είδους επιβολή μεταξύ τους. Ο κάθε παίκτης, είτε πρόκειται για κράτος είτε για περιφέρεια, επιλέγει αν θα συνυπογράψει τη συμφωνία και θα γίνει μέλος μιας ξεχωριστής συμμαχίας. Στη συνέχεια οι συμμαχίες αλλά και οι μοναχικοί παίκτες ρυθμίζουν τα επίπεδα μείωσης των εκπομπών τους σε GHG, παίζοντας ένα παίγνιο Nash-Cournot. Καθώς η ρύθμιση των εκπομπών είναι ένα αμιγώς κοινό καλό, η ισορροπία του παραπάνω παιγνίου θα είναι σε κάθε περίπτωση ανεπαρκής. Μόνο η σύναψη της υπερ-συμμαχίας μπορεί να ξεπεράσει αυτό το σκόπελο.

Ωστόσο η υπάρχουσα βιβλιογραφία στα παίγνια συμμαχιών υποστηρίζει ότι οι μεγάλοι σχηματισμοί, συμπεριλαμβανομένης και της υπερ-συμμαχίας, είναι σταθεροί μόνο όταν τα οφέλη των μελών τους είναι μικρά. Στην αντίθετη περίπτωση που τα κέρδη των μελών είναι μεγάλα, οι σταθερές συμμαχίες που σχηματίζονται είναι μικρές και αναποτελεσματικές όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών (Barret (1994), Finus and Rundshagen (2003)). Τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σε μοντέλα που συμμετείχαν όμοιοι παίκτες και δε μπορούν να γενικευτούν στην περίπτωση παικτών με ανόμοια χαρακτηριστικά.

Το εξεταζόμενο μοντέλο των Hans-Peter Weikard, Rob Dellink (2010) διαφοροποιείται από τα προηγούμενα και δείχνει ότι είναι δυνατό να υπάρξουν σταθερές και αποτελεσματικές κλιματολογικές συμφωνίες. Τρεις είναι οι κύριοι άξονες του μοντέλου που οδηγούν σε αυτά τα αποτελέσματα :

- Πρώτον, εξετάζονται ασύμμετρα κράτη, δηλαδή κράτη που διαφέρουν στο κόστος μείωσης των εκπομπών τους. Μία συμμαχία που απαρτίζεται από κράτη με μικρό κόστος μείωσης, διαθέτει φθηνές εναλλακτικές επιλογές για τον περιορισμό των εκπομπών της, και φυσικά τέτοιου τύπου μέλη είναι επιθυμητά σε κάθε συμμαχία.
- Δεύτερον, λαμβάνονται υπόψη οι ανταλλαγές, ή καλύτερα, η διανομή των κερδών της συμμαχίας μεταξύ των μελών της. Για να βρεθεί ο βέλτιστος κανόνας διανομής χρησιμοποιείται ο όρος του εξωγενούς εναλλακτικού κέρδους. Ως εξωγενές εναλλακτικό κέρδος, ορίζεται το κέρδος που θα αποκόμιζε ο παίκτης αν εγκατάλειπε τη συμμαχία. Αντίστοιχα, εσωτερική σταθερότητα της συμμαχίας δύναται να υπάρξει αν το συνολικό κέρδος αυτής είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα των εναλλακτικών εξωγενών κερδών των μελών της. Εφόσον ισχύει αυτή η συνθήκη, η εύρεση ενός βέλτιστου κανόνα διανομής μπορεί να εγγυηθεί την εσωτερική σταθερότητα .
- Τρίτον, επιτρέπονται επαναδιαπραγματεύσεις της ισχύουσας συμφωνίας. Το στοιχείο αυτό ενισχύει την πιθανότητα της συνειδητής συμμετοχής στη συμμαχία, και άρα και τη σταθερότητά της. Για παράδειγμα, κάποιος παίκτης μπορεί σε πρώτο στάδιο να προσχώρησε στη συμμαχία υπό το φόβο μιας πιθανής τιμωρίας, και να αισθάνεται μετανιωμένος. Στο δεύτερο στάδιο μπορεί να επαναδιαπραγματευθεί και να ανταμειφθεί για την προηγούμενη συμμετοχή του, κάτι που δε θα μπορούσε να γίνει στα παίγνια χωρίς διαπραγμάτευση όπου πιθανότατα θα αποχωρούσε, προκαλώντας και την κατάρρευση της συμμαχίας.

Για να μπορέσουν οι δύο μελετητές να εξετάσουν την επίδραση των επαναδιαπραγματεύσεων και να προσδιορίσουν ένα βέλτιστο κανόνα διανομής, χρησιμοποιούν το μοντέλο STACO που ανακαλύφθηκε από τον Finus (2006), και εξελίχθηκε από τον Nagashima (2009). Πρόκειται για ένα μοντέλο προσομοίωσης 12 περιφερειών, για καθεμία από τις οποίες προσδιορίζονται τα οριακά κόστη και οι συναρτήσεις ωφέλειας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εύρεση ενός βέλτιστου κανόνα διανομής των κερδών εντός της συμμαχίας, μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη. Ο μέγιστος αριθμός μελών των σταθερών συμμαχιών που μπορούν να σχηματιστούν χωρίς επαναδιαπραγματεύσεις είναι 6 επί συνόλου 12 περιφερειών. Η πιο αποδοτική συμμαχία απαρτίζεται από 5 μέλη, και επιτυγχάνει κέρδη ίσα με το 46% αυτών της υπερ-συμμαχίας. Ως βάση αναφοράς λαμβάνονται τα κέρδη που προκύπτουν από το σενάριο της μη-συνεργασίας, και συνεπώς ως κέρδος της υπερ-συμμαχίας λογίζεται το πλεόνασμά της από τη βάση αναφοράς.

Εισάγοντας την παράμετρο των επαναδιαπραγματεύσεων και θεωρώντας δύο περιόδους δέσμευσης, προκύπτει ότι για μία πρώτη δεκαετή ή εικοσαετή περίοδο δέσμευσης είναι δυνατό να σχηματιστεί η υπερ-συμμαχία, ενώ στη δεύτερη περίοδο σχηματίζεται μια συμμαχία 5 περιφερειών. Τα συνολικά κέρδη της βέλτιστης ακολουθίας συμμαχιών αγγίζουν το 59% των κερδών που θα πετύχαινε η υπερ-συμμαχία και στις δύο περιόδους.

Στην επόμενη ενότητα εισάγεται ο κανόνας βέλτιστης διανομής για πολλαπλή περίοδο δέσμευσης, και επεκτείνεται ο ορισμός της εσωτερικής και εξωτερικής σταθερότητας, ώστε να συμπεριλάβει και την επίδραση των επαναδιαπραγματεύσεων στο παίγνιο. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη παράθεση των εμπειρικών προδιαγραφών του μοντέλου STACO, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και γίνεται σχολιασμός τους.

3.2.2.2 Βέλτιστος κανόνας διανομής σε τέλειες κατά Paretto συμμαχίες

Ας θεωρηθεί ένα παίγνιο δημιουργίας συμμαχιών με επαναδιαπραγματεύσεις. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένας πεπερασμένος αριθμός δεσμευτικών περιόδων t = 1,…,T, κατά τις οποίες τα διάφορα κράτη $i \in N$ αποφασίζουν κάθε φορά αν θα ενταχθούν, ή όχι, σε κάποια συμμαχία. Τα κέρδη ή οι απώλειες κατά την περίοδο t εξαρτώνται από την αντίστοιχη συμμαχία $K^t \subseteq N$.

Στο σημείο αυτό θα τονιστεί ξανά ότι η μείωση των εκπομπών GHG είναι κοινό καλό. Σε τέτοιου είδους παίγνια ως μόνη αποδοτική συμμαχία θεωρείται η υπερ-συμμαχία K=N, ενώ κάθε άλλη $K \subset N$ είναι μη αποδοτική. Επίσης κάθε ατομικός σχηματισμός K={i} είναι αναποτελεσματικός και έχει την ίδια τιμή παιγνίου όπως ο $K = \varnothing$. Και οι δύο παραπάνω σχηματισμοί θεωρούνται ισοδύναμοι και θα αναφέρονται ως «ατομικοί σχηματισμοί».

Σε κάθε παίγνιο υπάρχει για κάθε περίοδο t η ***συνάρτηση διανομής (partition function)*** $V^t(K^t)$, η οποία δίνει την τιμή του παιγνίου για ολόκληρη τη συμμαχία V_K^t αλλά και για κάθε μοναχικό παίκτη $V_j^t(K^t), j \notin K^t$. Για την κατανομή των κερδών (ζημιών) $V_K(K)$ της συμμαχίας μεταξύ των μελών της υπό τον *κανόνα διανομής r* χρησιμοποιείται η ***συνάρτηση αξιολόγησης*** $V({}^r K)$, και τα ατομικά οφέλη των παικτών συμβολίζονται με $V_i({}^r K)$.

Ασφαλώς για κάθε κανόνα διανομής r ισχύει $V_K(K) = \sum_{i \in K} V_i({}^r K)$.Επίσης υιοθετείται ο συμβολισμός K_{-i} για $K \setminus \{i\}$ με $i \in K$, και, K_{+j} για $K \cup \{j\}$ με $j \notin K$. Το πλεόνασμα της συμμαχίας δίνεται από τη σχέση $S_K \equiv V_K(K) - \sum_{i \in K} V_i(K_{-i})$. Με $V_i(K_{-i})$ συμβολίζεται το εξωγενές εναλλακτικό κέρδος ή ζημία του παίκτη i, το οποίο είναι ανεξάρτητο από τον κανόνα διανομής της νέας συμμαχίας K_{-i}.

Ας θεωρηθεί η τελική περίοδος T και ένας κανόνα διανομής για τη συμμαχία K^T, ώστε κάθε μέλος $i \in K^T$ να λαμβάνει αντίτιμο τουλάχιστον ίσο με το εξωγενές εναλλακτικό του κέρδος $V_i^T(K_{-i}^T)$, συν ένα μη αρνητικό μερίδιο s_i^T από το πλεόνασμα της συμμαχίας, εφόσον αυτό υπάρχει, δηλαδή $S_{K^T} \geq 0$. Σε διαφορετική περίπτωση αν $S_{K^T} \prec 0$, αντί της πρόσθεσης του μεριδίου του κέρδους γίνεται αφαίρεση των αντίστοιχων ζημιών.

Αυτός ο κανόνας διανομής, που αναφέρεται ως «βέλτιστος κανόνας διανομής», μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$V_i^T({}^r K^T) = V_i^T(K_{-i}^T) + s_i^T, \forall i \in K^T \tag{3.16}$$

με $\sum_{i \in K^T} s_i^T = S_{K^T}$, και, $\forall i \in K^T$, $s_i^T \geq 0$, αν και μόνο αν $S_{K^T} \geq 0$

Η βέλτιστη διανομή έχει ως προτεραιότητά της την παροχή κινήτρων για την ένταξη στη συμμαχία. Ο Weikard (2009) απέδειξε ότι κάθε συμμαχία που είναι εσωτερικά σταθερή υπό έναν αυθαίρετο κανόνα διανομής, θα είναι εσωτερικά σταθερή και υπό το «βέλτιστο κανόνα διανομής» της σχέσης (3.16).

Ορισμός 3.1

i. Μία συμμαχία K είναι εσωτερικά σταθερή υπό τον κανόνα διανομής r αν και μόνο αν $V_i({}^r K) \geq V_i(K_{-i}), \forall i \in K$

ii. Μία συμμαχία K είναι εσωτερικά σταθερή υπό τον κανόνα διανομής r αν και μόνο αν $V_j(K) \succ V_j({}^r K_{+j}), \forall j \in N \setminus K$.

iii. Μία συμμαχία είναι σταθερή υπό το δοθέντα κανόνα διανομής αν και μόνο αν είναι εσωτερικά και εξωτερικά σταθερή.

Σε ένα παίγνιο όμως με επαναδιαπραγματεύσεις ο ορισμός 3.1 περί σταθερότητας πρέπει να τροποποιηθεί. Πρώτον γιατί πλέον αντικείμενο της σταθερότητας δεν είναι μία συμμαχία υπό ένα κανόνα διανομής r, αλλά μία ακολουθία συμμαχιών υπό διαφορετικούς κανόνες $({}^{r^1} K^1, ..., {}^{r^T} K^T)$.

Έτσι εισάγεται ο όρος ότι μία συμμαχία ${}^r K^t$ είναι *γενικευμένα σταθερή* υπό τον κανόνα r , εάν κανένα μέλος της δε θέλει να την εγκαταλείψει και κανένα μη- μέλος να προσχωρήσει σε αυτήν. Πρέπει να επισημανθεί ότι η γενικευμένη σταθερότητα μιας συμμαχίας σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, είναι πιθανό να εξαρτάται από τις συμμαχίες και τους εφαρμοζόμενους κανόνες διανομής προηγούμενων περιόδων. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν έχει ισχύ ο ορισμός 3.1 για μια ακολουθία συμμαχιών.

Πριν γίνει όμως παράθεση του ορισμού περί γενικευμένης σταθερότητας μιας ακολουθίας συμμαχιών, είναι σκόπιμο να επεξηγηθούν οι συμβολισμοί που θα χρησιμοποιηθούν.

Με ${}^w \tilde{K}_i^T$ συμβολίζεται η σταθερή, μη βέλτιστη κατά Paretto, συμμαχία υπό κανόνα διανομής w, που αποδίδει στον παίκτη i το χειρότερο αποτέλεσμα από όλες τις υπόλοιπες σταθερές συμμαχίες κατά την περίοδο T, δηλαδή $V_i^T({}^w \tilde{K}_i^T) \leq V_i^T({}^r K^T)$ για όλες τις σταθερές συμμαχίες ${}^r K^T$. Αυτή η τιμή λαμβάνεται συχνά από τους παίκτες ως φόβητρο, όταν καλούνται να λάβουν την απόφαση σε ποια συμμαχία θα ενταχθούν την αμέσως προηγούμενη περίοδο δέσμευσης T-1.

Μπορεί πλέον να παρατεθεί ο ορισμός 3.2 της γενικευμένης σταθερότητας, ο οποίος γίνεται περιοδικά για την ακολουθία των συμμαχιών.

Ορισμός 3.2

i. Στην τελευταία περίοδο T μία συμμαχία K^T είναι γενικευμένα σταθερή υπό τον κανόνα r^T, αν και μόνο αν είναι σταθερή (σύμφωνα με τον ορισμό 3.1).

ii. Μία ακολουθία συμμαχιών $({}^{r^{T-1}}K^{T-1}, {}^{r^T}K^T)$ είναι γενικευμένα σταθερή αν και μόνο αν η ${}^{r^T}K^T$ είναι γενικευμένα σταθερή, και $\forall i \in K^{T-1}$

$$V_i^{T-1}({}^{r^{T-1}}K^{T-1}) + V_i^T({}^{r^T}K^T) \geq V_i^{T-1}(K_{-i}^{T-1}) + V_i^T({}^{w}\tilde{K}_i^T) \tag{3.17}$$

και $\forall j \in N \setminus K^{T-1}$

$$V_j^{T-1}(K^{T-1}) + V_j^T({}^{r^T}K^T) \succ V_j^{T-1}(s^{T-1}K_{+j}^{T-1}) + V_j^T({}^{w}\tilde{K}_j^T) \tag{3.18}$$

iii. Για την εύρεση των συνθηκών γενικευμένης σταθερότητας μεγαλύτερων ακολουθιών πρέπει να επεξεργαστούν οι σχέσεις (3.17) και (3.18) αναδρομικά προς τα πίσω. Με W_i^t συμβολίζεται το κέρδος της χειρότερης δυνατής ακολουθίας συμμαχιών από τη χρονική στιγμή t και μετά.

Μια ακολουθία συμμαχιών συνολικής διάρκειας T-t+1, π.χ. $({}^{r^t}K^t, {}^{r^T}K^T)$ είναι γενικευμένα σταθερή αν η υποακολουθία διάρκειας T-t είναι γενικευμένα σταθερή και $\forall i \in K^t$

$$V_i^t({}^{r^t}K^t) + \sum_{\tau=t+1}^{T} V_i^\tau({}^{r^\tau}K^\tau) \geq V_i^t(K_{-i}^t) + W_i^{t+1} \tag{3.19}$$

και $\forall j \in N \setminus K^t$

$$V_j^t(K^t) + \sum_{\tau=t+1}^{T} V_j^\tau({}^{r^\tau}K^\tau) \succ V_j^t({}^{s^t}K_{+j}^t) + W_j^{t+1}$$

Ορισμός 3.3

i. Στην τελευταία περίοδο T μια συμμαχία K^T υπό τον κανόνα διανομής r είναι βέλτιστη κατά Paretto αν και μόνο αν είναι σταθερή και δεν κυριαρχείται κατά Paretto από καμία άλλη σταθερή συμμαχία.

ii. Μία ακολουθία συμμαχιών $({}^{r^t}K^t, ..., {}^{r^T}K^T)$ είναι βέλτιστη κατά Paretto αν είναι γενικευμένα σταθερή και δεν κυριαρχείται κατά Paretto από καμία άλλη γενικευμένα σταθερή ακολουθία στο χρονικό διάστημα t έως T, και επιπλέον όλες οι

υποακολουθίες της $({}^{r^{t-1}}K^{t-1},...,{}^{r^T}K^T),({}^{r^{t-2}}K^{t-2},...,{}^{r^T}K^T),...,({}^{r^T}K^T)$ είναι γενικευμένα σταθερές και δεν κυριαρχούνται κατά Paretto.

Στα πλαίσια της παρουσίασης του άρθρου θα αναλυθούν παίγνια δύο περιόδων (T=2). Η ανάλυση μπορεί να επεκταθεί και σε περισσότερες περιόδους χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.17) και (3.18) αναδρομικά προς τα πίσω.

Για T=2, $V_i^2({}^w\tilde{K}_i^2)$ είναι η χειρότερη δυνατή τιμωρία που μπορεί να υποστεί ο παίκτης i κατά τη δεύτερη περίοδο. Οι συνθήκες (3.17), (3.18) για τη γενικευμένη σταθερότητα της ακολουθίας $({}^{r^1}K^1,{}^{r^2}K^2)$ διαμορφώνονται ως εξής

$$V_i^1({}^{r^1}K^1)+V_i^2({}^{r^2}K^2)\geq V_i^1(K_{-i}^1)+V_i^2({}^w\tilde{K}_i^2) \tag{3.20}$$

$$V_j^1(K^1)+V_j^2({}^{r^2}K^2)\succ V_j^1(s^1K_{+j}^1)+V_j^2({}^w\tilde{K}_j^2) \tag{3.21}$$

Με απλά λόγια η εξίσωση (3.20) υπαγορεύει ότι το κέρδος ενός μέλους κατά την 1η περίοδο της συμμαχίας πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το κέρδος που θα είχε αν εγκατέλειπε τη συμμαχία K^1. Η συνθήκη (3.21) απαιτεί ότι κάθε μοναχικός παίκτης θα λαμβάνει κέρδος μεγαλύτερο αυτού που θα λάμβανε αν εντασσόταν στη συμμαχία. Οι παραπάνω εξισώσεις δεν αποτελούν τίποτα παραπάνω από τη γενίκευση του ορισμού της εσωτερικής και εξωτερικής σταθερότητας αντίστοιχα. για μια απλή συμμαχία.

Για να είναι όμως μία συμμαχία K^1 τμήμα μιας γενικευμένα σταθερής ακολουθίας συμμαχιών πρέπει κάθε μέλος αυτής, να λαμβάνει ένα κέρδος ίσο τουλάχιστον με το τίμημα απόσχισης :

$$D_i(K^1)\equiv V_i(K_{-i}^1)+V_i^2({}^w\tilde{K}_i^2) \tag{3.22}$$

Αυτό σημαίνει ότι ικανή συνθήκη για τη γενικευμένη σταθερότητα της K^1 είναι το συνολικό άθροισμα των κερδών των μελών της συμμαχίας να είναι τουλάχιστον ίσο με το άθροισμα των τιμημάτων πιθανής απόσχισης, δηλαδή :

$$\sum_{i\in K^1}\left[V_i({}^{r^1}K^1)+V_i\ ({}^{r^2}K^2)\right]\geq\sum_{i\in K^1}D_i(K^1) \tag{3.23}$$

Η γενικευμένη σταθερότητα της συμμαχίας K^1 εξαρτάται λοιπόν από το τίμημα απόσχισης των μελών της, και από τον κανόνα διανομής που θα εφαρμοστεί κατά την 2η περίοδο. Η τελευταία εξάρτηση ισχύει μόνο για τα κράτη εκείνα που θα συμμετέχουν στην K^1 και στην K^2 ($i\in K^1\cap K^2$). Σε διαφορετική περίπτωση το τίμημα απόσχισης

προσδιορίζεται περαιτέρω από τη συνάρτηση συμμετοχής που καθορίζει τα κέρδη των μοναχικών παικτών, και έτσι το εξωγενές εναλλακτικό κόστος της 1ης περιόδου για τον παίκτη $i \in K^1$ είναι ανεξάρτητο από τον κανόνα διανομής. Αν ο παίκτης $i \in K^1$ αποσχιστεί, τότε το κέρδος του για τη 2η περίοδο θα είναι $V_i^2({}^w\tilde{K}_i^2)$, ενώ αν ο παίκτης i είναι μοναχικός, δηλαδή $i \notin \tilde{K}_i^2$, τότε το κέρδος του για τη δεύτερη περίοδο είναι ανεξάρτητο του κανόνα διανομής w.

Μετά την επεξήγηση των παραπάνω όρων που θέτουν το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο θα βασιστεί το μοντέλο μπορούν στην επόμενη ενότητα να περιγραφούν η μέθοδος προσομοίωσής του, καθώς και οι πηγές των αριθμητικών δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν.

3.2.2.3 Αριθμητικό μοντέλο και πηγές δεδομένων

Στην ενότητα αυτή γίνεται μία ανασκόπηση της μεθόδου προσομοίωσης, τα αποτελέσματα της οποίας θα παρατεθούν στην ενότητα 3.2.2.4. Στόχος του μοντέλου είναι η εύρεση της βέλτιστης κατά Paretto ισορροπίας σε ένα παίγνιο περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, δηλαδή ο προσδιορισμός μιας ακολουθίας διεθνών κλιματικών συμφωνιών, που είναι γενικευμένα σταθερή και επιτυγχάνει υψηλότερα οφέλη σε σχέση με άλλες γενικευμένα σταθερές ακολουθίες.

Επί της ουσίας το μοντέλο περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο διεξάγεται ένα παίγνιο δημιουργίας συμμαχιών που ακολουθείται από ένα παίγνιο μειώσεων των εκπομπών. Εξετάζεται η περίπτωση της μίας δεσμευτικής περιόδου, και, των δύο δεσμευτικών περιόδων όπου μεσολαβεί και ένας γύρος επαναδιαπραγματεύσεων.

Στα παίγνια συμμετέχει ένας αριθμός περιφερειών N = {1,2,…,n} και στην αρχή της κάθε δεσμευτικής περιόδου t (t=1,2) ο παίκτης i επιλέγει μεταξύ του συνόλου στρατηγικών $\sigma_i^t \in \{0,1\}$. Για $\sigma_i^t = 0$ σημαίνει ότι ο παίκτης i δε συμμετέχει στην κλιματολογική συμφωνία κατά την περίοδο t, ενώ $\sigma_i^t = 1$ ότι είναι μέλος της..

Ας θεωρηθεί τώρα ότι το πρώτο στάδιο ολοκληρώθηκε και έχει σχηματιστεί μια συμμαχία $K^t \subseteq N$ κατά την περίοδο t. Τα μέλη της πλέον συμμετέχουν στο παίγνιο μείωσης εκπομπών, όπου ο κάθε παίκτης λειτουργεί αυτόβουλα με στόχο τη μεγιστοποίηση

των κερδών της συμμαχίας, λαμβάνοντας πάντα υπόψη και τις στρατηγικές των ανεξάρτητων παικτών. Αυτοί με τη σειρά τους αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση του οφέλους τους, το οποίο φυσικά επηρεάζεται από τις στρατηγικές των συμμαχιών.

Γενικά η στρατηγική μείωσης των εκπομπών GHG του παίκτη i κατά την περίοδο t συμβολίζεται $\bar{q}_i^t$, ενώ η στρατηγική του που οδηγεί στην ισορροπία Nash κατά την ίδια περίοδο με $\bar{q}_i^{*t}$. Για το παίγνιο μείωσης των εκπομπών υπάρχει η συνάρτηση διανομής που καθορίζει την τιμή του παιγνίου για τις σχηματιζόμενες συμμαχίες αλλά και για τους ανεξάρτητους παίκτες.

Κάθε παίκτης απολαμβάνει ένα όφελος b_i ως ευεργετική συνέπεια της συνολικής μείωσης των εκπομπών $\bar{q}^t = \sum_{i \in N} \bar{q}_i^t$, ενώ υφίσταται και ένα κόστος c_i από την προσπάθεια μείωσης των ιδίων εκπομπών $\bar{q}_i^t$.

Όπως έχει προαναφερθεί το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι μια εξέλιξη του STACO model που ανακαλύφθηκε από τον Finus (2006) και εξελίχθηκε από το Nagashima (2009) και φυσικά το Weikard (2010). Θα δοθεί βαρύτητα στις κύριες παραμέτρους του μοντέλου, ενώ για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον προσδιορισμό των συναρτήσεων οφέλους και κόστους, μπορεί κάποιος να ανατρέξει στο παράρτημα του δημοσιευμένου άρθρου του Weikard (2010).

Στον πίνακα 3.2 παρατίθενται οι δώδεκα περιφέρειες, οι οποίες πρόκειται να αναλυθούν από το μοντέλο. Ο διαχωρισμός των κρατών σε περιφέρειες είναι ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποίησαν οι Franz Hackl, Gerald Pruckner (2002), στο μοντέλο τους που αναλύθηκε στην §3.2.1. Αυτό διευκολύνει και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, που θα γίνει σε επόμενη ενότητα του κεφαλαίου.

Η περίοδος προσομοίωσης έχει διάρκεια 100 έτη, και εκτείνεται από το 2011 έως το 2110. Ο λόγος που οι δύο μελετητές περιορίζουν σχετικά το χρονικό ορίζοντα του μοντέλου τους, είναι ότι τα αποθέματα των ανθρακικών παραγώγων, που οφείλονται σε μεγάλο βαθμό για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δεν είναι ανεξάντλητα. Η επίδρασή τους στην ατμόσφαιρα, και αντίστοιχα οι δράσεις για την καταπολέμηση αυτής, αναμένεται να απασχολήσουν την ανθρωπότητα κυρίως μέχρι τον επόμενο αιώνα. Οι συνέπειες της επίδρασης τους βέβαια, μάλλον θα διαρκέσουν πολύ περισσότερο.

Πίνακας 3.2 Οι δώδεκα περιφέρειες που αναλύονται με το μοντέλο STACO

1. Η.Π.Α (USA)
2.ΙΑΠΩΝΙΑ (JPN)
3.ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΤΩΝ 15 (EU15)
4.ΥΠΟΛΟΙΠΕΣ OECD ΧΩΡΕΣ (OOE)
5.ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ (EET)
6. ΠΡΩΗΝ Ε.Σ.Σ.Δ (FSU)
7.ΧΩΡΕΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (EEX)
8.ΚΙΝΑ (CHN)
9.ΙΝΔΙΑ (IND)
10.ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΣΙΑΤΙΚΕΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΕΣ (DAE)
11.ΒΡΑΖΙΛΙΑ (BRA)
12.ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΚΡΑΤΗ (ROW)

Τα οριακά κόστη των περιφερειών εξαρτώνται τετραγωνικά από τα επίπεδα των μειώσεων των εκπομπών τους. Αντίστοιχα η οριακή ζημία (οριακό όφελος), όπως και στο προηγούμενο άρθρο, είναι γραμμική συνάρτηση των εκπομπών.

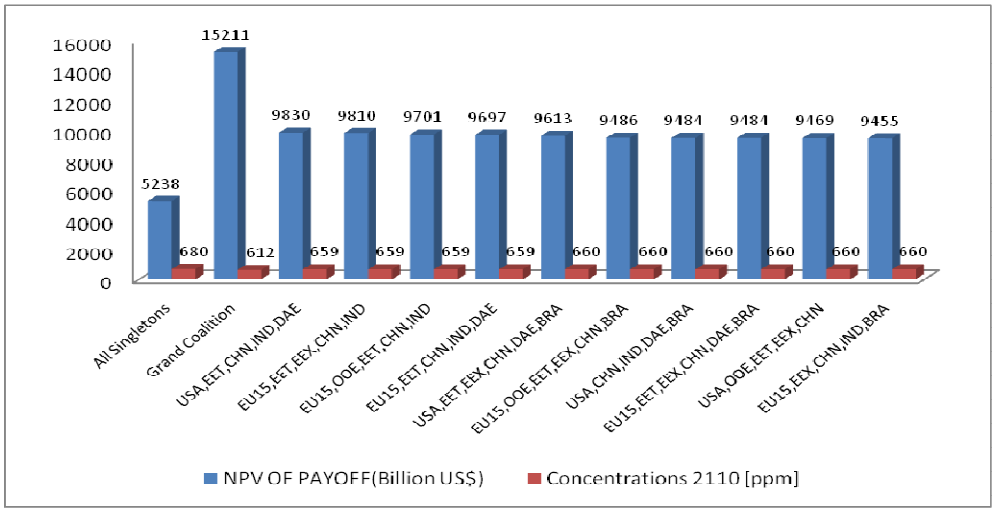
3.2.2.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου. Αρχικά για μία δεσμευτική περίοδο 100 ετών, και στη συνέχεια για δύο περιόδους διάρκειας 50 ετών έκαστη, με παρεμβολή ενός γύρου επαναδιαπραγματεύσεων. Επιπλέον προσδιορίζεται και ο βέλτιστος χρόνος διεξαγωγής των επαναδιαπραγματεύσεων.

3.2.2.4.1 Βέλτιστη διανομή για μία δεσμευτική περίοδο

Στην περίπτωση αυτή τα μέλη της συμμαχίας δεσμεύονται για τις μειώσεις των εκπομπών τους και για τη διανομή των κερδών τους, για ολόκληρη την περίοδο των 100 ετών.

Από το σύνολο των 2^{12}-12=4084 σχηματιζόμενων συμμαχιών, μόλις οι 108 αποδεικνύονται σταθερές και βέλτιστες κατά Paretto. Στο γράφημα 3.12 παρουσιάζονται οι βέλτιστες κατά Paretto συμμαχίες, οι καθαρές παρούσες τιμές των κερδών τους (σε δισ. Η.Π.Α.$), καθώς και οι συγκεντρώσεις (σε parts per million) των GHG στην ατμόσφαιρα στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Για να γίνει καλύτερη σύγκριση, δίνονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την υπερ-συμμαχία και για την περίπτωση που οι δώδεκα περιφέρειες πορεύονται ανεξάρτητα, παρότι που και οι δύο παραπάνω σχηματισμοί δεν είναι σταθεροί.



Γράφημα 3.12 Βέλτιστες κατά Paretto συμμαχίες για μία δεσμευτική περίοδο (Πηγή : Weikard, Dellink, (2010))

Μία βασική παρατήρηση είναι ότι μέλος όλων των βέλτιστων συμμαχιών είναι η Κίνα. Η συγκεκριμένη χώρα παρουσιάζει πολύ μικρό οριακό κόστος σε σχέση με τις υπόλοιπες, γεγονός που την καθιστά επιθυμητό μέλος σε κάθε συμμαχία. Μάλιστα συμμετέχει σε 50 από τις 108 συνολικά σταθερές συμμαχίες. Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια είναι να μπορεί να υποστηρίζεται οικονομικά από τα υπόλοιπα μέλη της συμμαχίας, και αυτός είναι ο λόγος που σε κάθε συμμαχία υπάρχει και μία τουλάχιστον ισχυρή οικονομικά περιφέρεια.

Πράγματι σε κάθε μία από τις 10 βέλτιστες συμμαχίες εμφανίζεται είτε η Ε.Ε.15 είτε οι Η.Π.Α., οι οποίες είναι σε θέση να παρέχουν αντισταθμιστικά οφέλη στις λιγότερο αναπτυγμένες οικονομικά περιφέρειες.

Στον πίνακα 3.3 δίνονται ο ρυθμός ποσοστιαίας μείωσης των εκπομπών το έτος 2011, σε σχέση με της εκπομπές του σεναρίου B.A.U. των 12 περιφερειών για την περίπτωση που πορεύονται ανεξάρτητα. Επίσης αναφέρονται αναλυτικά στοιχεία για τη βέλτιστη προσομοιωμένη συμμαχία, που αποτελείται από τις Η.Π.Α., τις χώρες της κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης, την Κίνα, την Ινδία, και, τις Δυναμικές Ασιατικές Οικονομίες. Όπως διαπιστώνεται από τη σύγκριση της καθαρής παρούσης αξίας των κερδών τους όλες αυτές οι περιφέρειες επωφελούνται σημαντικά από τη συνεργασία τους αυξάνοντας τα συνολικά τους κέρδη τουλάχιστον κατά 50%.

Πίνακας 3.3 Αναλυτικά αποτελέσματα για τη συμμαχία {U.S.A., EET, CHN, IND, DAE} (Πηγή : Weikard, Dellink, (2010))

	All-Singletons		Συμμαχία των U.S.A.,EET,CHN,IND,DAE			
	Μειώσεις εκπομπών το 2011 [% των B.A.U. Εκπομπών]	NPV των κερδών [Billion US$]	Μειώσεις εκπομπών το 2011 [% των B.A.U. Εκπομπών]	NPV των κερδών [Billion US$]	NPV των ανταλλαγών [Billion US$]	Κίνητρο αλλαγής συμμαχίας [NPV σε Billion US$]
U.S.A.	9.9	1117	**13.2**	**1603**	**-663**	**-9**
JPN	2.5	943	2.5	1933	0	-207
EU15	7.6	1240	7.6	2595	0	-274
OOE	5.6	188	5.6	386	0	-19
EET	4.4	71	**28.7**	**138**	**64**	**-1**
FSU	6.7	362	6.7	749	0	-59
EEX	1.9	164	1.9	336	0	-15
CHN	14.8	298	**50.1**	**415**	**452**	**-2**
IND	10.5	268	**37.8**	**485**	**83**	**-3**
DAE	1.9	136	**18.1**	**261**	**64**	**-1**
BRA	0.1	84	0.1	172	0	-4
ROW	6.3	365	6.3	755	0	-60
Global	8.0	5238	16.9	9830	0	-654

Η περιφέρεια με τα υψηλότερα οριακά οφέλη είναι οι Η.Π.Α. και γι' αυτό το λόγο οι χρηματοροές εντός της συμμαχίας γίνονται από αυτήν προς τις υπόλοιπες περιφέρειες. Αντίθετα η Κίνα που έχει το χαμηλότερο οριακό κόστος αναγκάζεται να περιορίσει κατά 50.1% τις εκπομπές της και φυσικά σε αυτήν καταλήγει το σημαντικότερο μερίδιο (452 δις.U.S.$) από τις ανταλλαγές χρηματοροών εντός της συμμαχίας.

Οι ανεξάρτητοι παίκτες που επωφελούνται σημαντικά από τη δημιουργία αυτής της συμμαχίας είναι η Ε.Ε.15 και η Ιαπωνία, οι οποίες διατηρούν αμετάβλητα τα επίπεδα των εκπομπών τους, ωστόσο κερδίζουν από τη μείωση των εκπομπών των μελών της συμμαχίας σε σχέση με αυτές που θα είχαν αν λειτουργούσαν αυτόνομα. Έτσι λοιπόν έχουν πολύ ισχυρά αντικίνητρα να θέλουν να προσχωρήσουν στη συμμαχία.

3.2.2.4.2 Βέλτιστη διανομή με παίγνια επαναδιαπραγματεύσης

Α. Επαναδιαπραγματεύσεις έπειτα από 50 έτη

Όπως προαναφέρθηκε η εισαγωγή του στοιχείου των επαναδιαπραγματεύσεων οδηγεί σε μεγαλύτερες συμμαχίες στην πρώτη περίοδο, και μικρότερες στη δεύτερη, καθώς τιμωρούνται πιθανές στρατηγικές διαφοροποίησης.

Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι δέκα βέλτιστες κατά Paretto, σταθερές ακολουθίες καθώς και τα κέρδη που επιτυγχάνουν. Αυτό που γίνεται άμεσα αντιληπτό είναι ότι οι

συμμαχίες της δεύτερης περιόδου έχουν τον ίδιο αριθμό μελών με τις συμμαχίες της μίας συνεχόμενης περιόδου 100 ετών, παρότι έχουν σχεδόν τη μισή διάρκεια. Οι δε συμμαχίες της πρώτης περιόδου εμφανίζονται περισσότερο αποτελεσματικές και φιλόδοξες.

Πίνακας 3.4 Βέλτιστες σταθερές συμμαχίες για παίγνια με επαναδιαπραγματεύσεις έπειτα από 50 έτη (Πηγή : Weikard, Dellink, (2010))

ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΣΥΜΜΑΧΙΑΣ		NPV των κερδών [Billion US$]		
1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ	1η ΠΕΡ.	2η ΠΕΡ.	ΣΥΝΟΛΟ
JPN,OOE,EET,FSU,CHN,IND,DAE,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	6528	4409	10937
JPN,OOE,EET,FSU,CHN,IND,DAE,ROW	EU15,EET,EEX,CHN,IND	6528	4402	10930
EU15,EET,FSU,CHN,IND,DAE,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	6511	4409	10920
EU15,EET,FSU,CHN,IND,DAE,ROW	EU15,EET,EEX,CHN,IND	6511	4402	10912
JPN,OOE,EET,FSU,CHN,IND,DAE,ROW	EU15,EET,CHN,IND,DAE	6528	4352	10880
USA,OOE,EET,EEX,CHN,IND,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	6469	4409	10878
JPN,OOE,EET,FSU,CHN,IND,DAE,ROW	EU15,OOE,EET,CHN,IND	6528	4346	10874
USA,EET,EEX,CHN,IND,DAE,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	6463	4409	10872
USA,OOE,EET,EEX,CHN,IND,ROW	EU15,EET,EEX,CHN,IND	6469	4402	10871
USA,OOE,EET,FSU,EEX,CHN,IND	USA,EET,CHN,IND,DAE	6458	4409	10868

Πρώτον, γίνεται φανερό ότι το μέγιστο συνολικό κέρδος από τις δύο περιόδους διαμορφώνεται στο 57% αυτού της υπερ-συμμαχίας, αισθητά μεγαλύτερο από το 46% που πετυχαίνει η βέλτιστη συμμαχία στα παίγνια της μίας δεσμευτικής περιόδου. Ο συνδυασμός των επαναδιαπραγματεύσεων και ενός βέλτιστου εσωτερικού κανόνα διανομής των κερδών, κάνει σημαντική διαφορά. Αυτό αποδεικνύεται συγκρίνοντας με το μοντέλο του Weikard (2010) ο οποίος πέτυχε μόλις το 25% των κερδών της υπερ-συμμαχίας εφαρμόζοντας έναν εξωγενή κανόνα διανομής σε ένα παίγνιο δύο περιόδων με επαναδιαπραγματεύσεις.

Δεύτερον, οι τρεις βέλτιστες ακολουθίες περιλαμβάνουν μία εκ των περιφερειών υψηλού οριακού κόστους (Η.Π.Α., Ε.Ε.15, Ιαπωνία) στο 1^{ο} στάδιο και μία διαφορετική εξ αυτών στο 2^{ο} στάδιο του παιγνίου. Αυτό εξηγείται γιατί και οι τρεις αυτοί παίκτες μπορούν να τα καταφέρουν αρκετά καλά παραμένοντας και ανένταχτοι. Αυτό ωστόσο είναι πιθανό να προκαλέσει στο 2^{ο} στάδιο τα αντίποινα των υπολοίπων για τη μη-συνεργασία. Έτσι εξαναγκάζονται να συνασπιστούν τουλάχιστον στη μία από τις δύο περιόδους του παιγνίου, καθώς είναι βαρύ το τίμημα της διαφοροποίησης και στις δύο φάσεις.

Τρίτον, τα μέλη που είναι παρόντα και στις δύο συμμαχίες έχουν την ευκαιρία να μοιράζονται το μεγαλύτερο κομμάτι του πλεονάσματος, αφήνοντας για τα περιστασιακά μέλη ένα ποσό ίσο με το εξωγενές εναλλακτικό τους κέρδος. Αυτό αποτελεί ένα πρόσθετο κίνητρο

καθολικής συμμετοχής που υιοθετούν πλήρως η Κίνα, η Ινδία και οι χώρες εξαγωγής ενέργειας, που είναι παρούσες και στις δύο φάσεις των 10 βέλτιστων ακολουθιών. Ωστόσο αυτή η ανταμοιβή δεν είναι συνήθως αρκετή για τις περιφέρειες με υψηλό οριακό κόστος, και έτσι οι περισσότερες OECD περιφέρειες αποτελούν μόνο περιστασιακά μέλη των κλιματολογικών συμφωνιών.

Στον πίνακα 3.5 παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα για τη βέλτιστη ακολουθία συμμαχιών. Καθότι στο 2^{ο} στάδιο του παιγνίου δεν υπάρχει η απειλή της τιμωρίας, όλοι οι παίκτες συμμετέχουν στη συμμαχία επειδή μεγιστοποιούν τα ατομικά τους οφέλη. Μόνο οι Η.Π.Α., που συμμετέχουν ως περιστασιακό μέλος στη 2^{η} συμμαχία και λαμβάνουν μόνο το εξωγενές εναλλακτικό τους κέρδος, έχουν μηδενικό κίνητρο αλλαγής συμμαχίας.

Πίνακας 3.5 Αναλυτικά αποτελέσματα για τις συμμαχίες {JPN,OOE,FSU,CHN,IND, DAE,ROW} και {USA,EET,CHN,IND,DAE} της 1^{ης} και 2^{ης} δεσμευτικής περιόδου αντίστοιχα, με επαναδιαπραγμάτευση έπειτα από 50 έτη (Πηγή : Weikard, Dellink, (2010))

	Μειώσεις εκπομπών		NPV των κερδών		NPV των ανταλλαγών		Κίνητρο αλλαγής συμμαχίας	
	Το 2011 [% των B.A.U. Εκπομπών]	**Το 2061 [% των B.A.U. Εκπομπών]**	**1η περίοδος [Billion US$]**	**2η περίοδος [Billion US$]**	**1η περίοδος [Billion US$]**	**2η περίοδος [Billion US$]**	**1η περίοδος [Billion US$]**	**2η περίοδος [Billion US$]**
U.S.A.	9.9	**8.7**	1701	**722**	0	**-295**	-266.2	**0.0**
JPN	**6.5**	2.6	**657**	865	**--668**	0	**436.1**	-90.7
EU15	7.6	5.7	1817	1161	0	0	-273.3	-120.2
OOE	**21.0**	2.9	**164**	173	**-47**	0	**87.2**	-8.4
EET	**33.0**	**17.3**	**122**	**62**	**80**	**28**	**-25.3**	**-0.7**
FSU	**18.4**	5.0	**291**	336	**-126**	0	**170.6**	-25.9
EEX	1.9	1.7	235	150	0	0	-31.0	-6.7
CHN	**59.0**	**26.8**	**447**	**188**	**583**	**200**	**-149.9**	**-2.3**
IND	**44.2**	**16.9**	**450**	**219**	**194**	**38**	**--107.4**	**-2.6**
DAE	**21.8**	**13.0**	**233**	**117**	**108**	**29**	**-50.4**	**-1.4**
BRA	0.1	0.1	120	77	0	0	--18.4	-1.6
ROW	**20.8**	4.4	**293**	338	**-125**	0	**171.9**	-26.2
Global	21.5	11.0	6528	4409	0	0		

Το στοιχείο της τιμωρίας γίνεται φανερό στο 1^{ο} στάδιο του παιγνίου, όπου όλα τα προσωρινά μέλη έχουν κίνητρο να διαφοροποιηθούν. Η απόφασή τους ωστόσο δε λαμβάνεται με γνώμονα μόνο τα κέρδη της 1^{ης} περιόδου, αλλά συνολικά για τη χρονική περίοδο του ενός αιώνα. Ο κίνδυνος πιθανής τιμωρία τους κατά τη δεύτερη περίοδο, τους αναγκάζει να συνεργαστούν.

Αντίστοιχα και τα μόνιμα μέλη μπορεί να εξαναγκάζονται σε συνεργασία στην 1η περίοδο από το «μαστίγιο» ("stick") της τιμωρίας, ανταμείβονται όμως στη 2η περίοδο με το «καρότο» της απόκτησης του μεγαλύτερου μεριδίου από τα συνολικά κέρδη της ακολουθίας συμμαχιών και στα δύο στάδια.

Όπως και στην περίπτωση της μίας δεσμευτικής περιόδου, έτσι και εδώ, οι ισχυρές οικονομικά OECD χώρες επωφελούνται από την παράπλευρη μείωση των εκπομπών των υπόλοιπων περιφερειών, ενώ διατηρούν αμετάβλητα τα επίπεδα των δικών τους εκπομπών. Όποτε βέβαια συμμετέχουν σε κάποια συμμαχία ενισχύουν οικονομικά τις περιφέρειες με μικρό οριακό κόστος, ώστε αυτές με τη σειρά τους να περιορίσουν σημαντικά τις εκπομπές τους, προς όφελος του κοινού καλού.

Β. Βέλτιστη χρονική στιγμή επαναδιαπραγματεύσεων

Μία σημαντική παράμετρος που επίσης πρέπει να εξεταστεί είναι η εύρεση της κατάλληλης χρονικής στιγμής για τη διεξαγωγή των επαναδιαπραγματεύσεων. Παρατηρείται λοιπόν ότι η μείωση της διάρκειας της 1ης δεσμευτικής περιόδου οδηγεί στο σχηματισμό μεγαλύτερων συμμαχιών σε 1η φάση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι σε μία δεύτερη περίοδο μεγαλύτερης διάρκειας τα αντίποινα για τη μη συνεργασία μπορούν να είναι πολύ περισσότερα, αντίστοιχα μεγαλύτερος και ο εκφοβισμός των παικτών, και απολύτως λογική η ένταξή τους σε κάποια συμμαχία.

Πίνακας 3.6 Αναλυτικά αποτελέσματα για διαφορετικές περιόδους επαναδιαπραγμάτευσης (Πηγή : Weikard, Dellink, (2010))

ΕΠΑΝΑΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΕΙΣ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΌ…ΕΤΗ	ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΣΥΜΜΑΧΙΑΣ		NPV των κερδών [billion US$]	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 2110 [ΣΕ ppm]
	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ		
10	USA,JPN,EU15,OOE,EET,FSU, EEX,CHN,IND,DAE,BRA,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	10451	657
20	USA,JPN,EU15,OOE,EET,FSU, EEX,CHN,IND,DAE,BRA,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	11073	654
30	USA,JPN,OOE,EET,FSU,EEX, CHN, IND,DAE,BRA,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	11431	654
40	USA,EET,FSU,EEX,CHN, IND, DAE, BRA,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	11238	655
50	JPN,OOE,EET,FSU,CHN,IND, DAE,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	10937	655
60	USA,EET,EEX,CHN,IND,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	10647	656
70	USA,OOE,EET,EEX,CHN,IND	USA,EET,CHN,IND,DAE	10397	657
80	EU15,EET,CHN,IND,ROW	USA,EET,CHN,IND,DAE	10096	657
90	USA,EET,EEX,CHN,IND	USA,EET,CHN,IND,DAE	9938	658

Ωστόσο η αύξηση του μεγέθους της συμμαχίας δεν εγγυάται από μόνη της περισσότερα κέρδη και μεγαλύτερες μειώσεις των εκπομπών. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι ενώ οι πρόωρες επαναδιαπραγματεύσεις ενισχύουν το φόβο της πιθανής τιμωρίας, ο οποίος ευνοεί το σχηματισμό μεγάλων και σταθερών συμμαχιών, εντούτοις η διεξαγωγή τους μεταγενέστερα, χαρίζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στην περισσότερο φιλόδοξη $1^{η}$ συμμαχία, και έτσι αυξάνει τα συνολικά κέρδη.

Για την εύρεση του βέλτιστου χρόνου επαναδιαπραγμάτευσης πρέπει κάποιος να ισορροπήσει μεταξύ των δύο παραπάνω απαιτήσεων. Παράλληλα, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.6 μόνο οι συμμαχίες της $1^{ης}$ περιόδου επηρεάζονται από αυτήν την παράμετρο, ενώ αυτές της $2^{ης}$ περιόδου παραμένουν ανεπηρέαστες.

Αυτό που μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα από τον πίνακα 3.5 είναι ότι όσο καθυστερεί ο χρόνος επαναδιαπραγμάτευσης, τόσο εξασθενεί η απειλή της πιθανής τιμωρίας στο $2^{ο}$ στάδιο και γίνονται αναποτελεσματικές οι βέλτιστες σχηματιζόμενες ακολουθίες.

Επίσης, όταν η $1^{η}$ δεσμευτική περίοδος είναι σχετικά μικρή, είναι δυνατό να σχηματιστεί σε $1^{η}$ φάση μια σταθερή υπερ-συμμαχία. Μάλιστα όταν η διάρκεια της $1^{ης}$ περιόδου είναι από 10 έως 20 έτη το σύνολο των σχηματισμών είναι γενικευμένα σταθερές συμμαχίες 11 μελών, από όπου εξαιρούνται μόνο η Βραζιλία ή η Ιαπωνία.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι δύο αυτές περιφέρειες έχουν πολύ απότομη καμπύλη μεταβολής οριακού κόστους. Έτσι η ένταξή τους σε κάποια συμμαχία, ακόμη και ως περιστασιακό μέλος, δεν τους προσφέρει τίποτα περισσότερο από το εξωγενές εναλλακτικό τους κέρδος, ενώ και τα υπόλοιπα μέλη πρέπει να προσφέρουν μεγάλο μερίδιο του πλεονάσματος της συμμαχίας για να αντισταθμιστεί το υψηλό οριακό κόστος. Ακόμη κι έτσι όμως οι υπόλοιπες περιφέρειες δεν επωφελούνται σημαντικά, καθώς τα επίπεδα μείωσης των εκπομπών αυτών των δύο μελών θα παραμένουν μικρά.

Ο σχηματισμός της σταθερής υπερ-συμμαχίας με τα υψηλότερα κέρδη επιτυγχάνεται με επαναδιαπραγματεύσεις έπειτα από 20 έτη, όπου αποκτάται το 59% των πιθανών κερδών για συνολική διάρκεια ενός αιώνα (100% στο $1^{ο}$ στάδιο και 46% στο $2^{ο}$ στάδιο). Η συμμαχία που πετυχαίνει τη μεγιστοποίηση των κερδών δημιουργείται με επαναδιαπραγματεύσεις έπειτα από 30 έτη, και αγγίζει το 62% των δυνητικών κερδών. Σε αντιδιαστολή, το ελάχιστο όφελος υπάρχει όταν η διάρκεια της $1^{ης}$ περιόδου φτάνει τα 90 έτη, και το ποσοστό των κερδών μόλις το 47%, ελάχιστα καλύτερο από αυτό που λαμβάνεται στο παίγνιο της μίας περιόδου.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα για τη βέλτιστη ακολουθία συμμαχιών παρουσιάζονται στον πίνακα 3.7. Το εντυπωσιακό στοιχείο είναι ότι όλα τα περιστασιακά μέλη της 1ης περιόδου, που τελικά αποχωρούν στη 2η περίοδο έχουν το κίνητρο να αποσχιστούν και από την 1η συμμαχία αλλά δεν το πράττουν για να αποφύγουν πιθανά αντίποινα στη 2η φάση.

Ορισμένες περιφέρειες, όπως η Κίνα και η Ινδία, πραγματοποιούν εντυπωσιακή μείωση των εκπομπών τους εντός της 1ης συμμαχίας (76.5% και 56.6% αντίστοιχα). Σε περίπτωση απουσίας οικονομικών ανταλλαγών η Κίνα θα έπρεπε να διαθέσει περισσότερα από 300 δις US$ για το σκοπό αυτό.

Η Ιαπωνία πρωτίστως καλείται να ενισχύσει οικονομικά αυτό το στόχο καθώς τα μελλοντικά αντισταθμιστικά οφέλη που λαμβάνει είναι σημαντικά. Επίσης οι Η.Π.Α. επωφελούνται σημαντικά τόσο από τη δημιουργία μιας φιλόδοξης συμμαχίας στ 1ο στάδιο, όσο και από την παρουσία της ως μόνιμο μέλος και στη 2η συμμαχία, που της εξασφαλίζει μεγαλύτερο μερίδιο στη διανομή των κερδών. Αυτές, μαζί με την Ε.Ε.15 που παραμένει ανένταχτη και στις δύο περιόδους, είναι οι μεγάλοι ευνοημένοι από τη δημιουργία αυτής της γενικευμένα σταθερής ακολουθίας συμμαχιών.

Πίνακας 3.7 Αναλυτικά αποτελέσματα για τις συμμαχίες {USA,JPN,OOE,EET,FSU, EEX,CHN,IND,DAE,BRA,ROW} και {USA,EET,CHN,IND,DAE} της 1ης και 2ης δεσμευτικής περιόδου αντίστοιχα, με επαναδιαπραγμάτευση έπειτα από 30 έτη (Πηγή : Weikard, Dellink, (2010))

	Μειώσεις εκπομπών		NPV των κερδών		NPV των ανταλλαγών		Κίνητρο αλλαγής συμμαχίας	
	Το 2011 [% των B.A.U. Εκπομπών]	**Το 2061 [% των B.A.U. Εκπομπών]**	**1η περίοδος [Billion US$]**	**2η περίοδος [Billion US$]**	**1η περίοδος [Billion US$]**	**2η περίοδος [Billion US$]**	**1η περίοδος [Billion US$]**	**2η περίοδος [Billion US$]**
U.S.A.	**19.7**	**10.6**	**1570**	**1071**	**323**	**-434**	**-425.9**	**-5.9**
JPN	**9.4**	2.8	**353**	1282	**-779**	0	**650.2**	-135.5
EU15	7.6	6.5	1577	1721	0	0	-291.5	-179.3
OOE	**26.1**	3.8	**90**	256	**-73**	0	**130.0**	-12.5
EET	**41.4**	**20.7**	**76**	**92**	**60**	**41**	**8.0**	**-0.5**
FSU	**22.9**	5.3	**153**	497	**-170**	0	**254.4**	-38.7
EEX	**23.9**	1.8	**76**	223	**-22**	0	**113.1**	-10.0
CHN	**76.5**	**30.6**	**359**	**277**	**688**	**296**	**-94.0**	**-1.5**
IND	**56.6**	**21.3**	**303**	**322**	**128**	**54**	**-1.9**	**-1.8**
DAE	**29.2**	**15.1**	**148**	**173**	**65**	**42**	**11.2**	**-1.0**
BRA	**5.1**	0.1	**44**	114	**-52**	0	**57.7**	-2.4
ROW	**26.5**	4.9	**154**	501	**-168**	0	**256.3**	-39.2
Global	30.4	12.8	4902	6529	0	0	-	-

3.2.3 "How Crucial is Cooperation in Mitigating World Climate? Analysis with World-Markal"

Στις προηγούμενες ενότητες (§3.2.1, §3.2.2) παρουσιάστηκαν δύο μοντέλα που διέφεραν αρκετά μεταξύ τους. Το ένα προτάσσει την αντιμετώπιση του φαινομένου με καθαρά εθνικά κριτήρια και υποβαθμίζει τη δημιουργία συμμαχιών, ενώ το δεύτερο συνιστά ως βέλτιστη λύση τη δημιουργία μεγάλων και ισχυρών σχηματισμών με οικονομική αλληλεπίδραση των κρατών.

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία πράγματι διχάζεται μεταξύ των δύο αυτών τάσεων . Το μοντέλο World-Markal που χρησιμοποιούν οι δύο μελετητές Maryse Labriet και Richard Loulou (2008), είναι ένα πολυσύνθετο εργαλείο, που αναλύει το πρόβλημα σε βάθος, και διαπιστώνει τους λόγους για την ύπαρξη των δύο αυτών διαφορετικών προτάσεων. Αυτό που το ξεχωρίζει είναι ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων που εξετάζει, και το καθιστούν ένα πολύ ολοκληρωμένο εργαλείο για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

3.2.3.1 Εισαγωγή

Το μοντέλο World-Markal που εξετάζεται στα πλαίσια αυτού του άρθρου είναι ένα τεχνοοικονομικό μοντέλο που μπορεί να προσομοιώσει τόσο στρατηγικές συνεργασίας όσο και διαφοροποίησης των παικτών, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος περιορισμού των εκπομπών αλλά και τις ζημίες (δυνητικά οφέλη) λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Σκοπός του άρθρου είναι να αξιολογήσει την προσπάθεια που απαιτείται - από την άποψη των τεχνολογικών εξελίξεων, των μειώσεων των εκπομπών και του οικονομικού κόστους- ώστε να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ των στρατηγικών συνεργασίας και μη-συνεργασίας, καθώς επίσης και να προσδιοριστούν οι ανταλλαγές εκείνες μεταξύ των μελών που μπορούν να διασφαλίσουν τη σταθερότητα μιας παγκόσμιας συμμαχίας. Παρόμοιες προσπάθειες έχουν γίνει και με προηγούμενα μοντέλα, όπως το μοντέλο RICE/DICE (Nordhaus and Yang (1996)). Όμως, όπως προαναφέρθηκε αυτό που διαφοροποιεί το συγκεκριμένο εγχείρημα είναι ότι πρόκειται για ένα τεχνολογικά πλούσιο μοντέλο που προσφέρει αυξημένη ανθεκτικότητα στους υπολογισμούς του.

Στην επόμενη ενότητα (§3.2.3.2) περιγράφονται οι θεμελιώδεις αρχές οι οποίες διαμορφώνουν τα πλαίσια για τη συνεργασία, ή μη, των κρατών στην προσπάθεια για τη σύναψη μίας διεθνούς κλιματολογικής συμφωνίας. Στην ενότητα §3.2.3.3 παρουσιάζεται το

τεχνολογικό υπόβαθρο του μοντέλου, ενώ ορίζονται και οι στρατηγικές μη-συνεργασίας που μπορούν να ακολουθήσουν τα διάφορα κράτη.

Στη συνέχεια, και στην ενότητα §3.2.3.4 αξιολογείται το χάσμα μεταξύ της παγκόσμιας συμμαχίας, που αποτελεί και τη βέλτιστη λύση, και της διαφοροποίησης όλων των παικτών. Στην §3.2.3.5 υπολογίζονται τέσσερις κανόνες διανομής του συνολικού παγκόσμιου οφέλους που μπορούν να εγγυηθούν τη σταθερότητα της υπερ-συμμαχίας, ενώ στην §3.2.3.6 εξετάζεται η δημιουργία μικρών συμμαχιών χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση.

3.2.3.2 Συνεργασία ή Διαφοροποίηση

Εξ ορισμού το μοντέλο Markal, όπως και πολλά άλλα μοντέλα βελτιστοποίησης, θεωρεί τη δημιουργία μιας παγκόσμιας συμμαχίας ως το βέλτιστο κατά Paretto σενάριο, που επιτυγχάνει τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τους περιβαλλοντικούς στόχους. Αυτό λοιπόν αποτελεί το άνω όριο των πιθανών αποτελεσμάτων.

Ωστόσο δε συνεπάγεται ότι όλες οι χώρες βελτιστοποιούν τα οφέλη τους αν γίνουν μέλη της υπερ-συμμαχίας. Ορισμένες ακολουθούν τη στρατηγική της διαφοροποίησης και έτσι επωφελούνται από τις μειώσεις εκπομπών των υπολοίπων, διατηρώντας υψηλά τα δικά τους επίπεδα εκπομπών. Κάποιες άλλες πάλι αποκομίζουν μεγαλύτερα οφέλη δημιουργώντας μια καινούρια συμμαχία (Barrett (1994), Carraro and Siniscalco (1992)).

Το σενάριο της μη-συνεργασίας αναπαριστά μια κατάσταση όπου κάθε περιφέρεια βελτιστοποιεί τα οφέλη της χωρίς να ενταχθεί σε κάποια συμμαχία, με την προϋπόθεση όμως να πράξουν και οι υπόλοιπες το ίδιο.

Αντίστοιχα το σενάριο της ισορροπίας Nash, είναι μία κατάσταση όπου καμία χώρα δε μπορεί να επωφεληθεί διαφοροποιώντας μόνο αυτή τη στρατηγική της. Θεωρείται το κάτω όριο των διαπραγματεύσεων, και συνήθως εκλαμβάνεται ως απειλή. Είναι αυτό που τελικά θα συμβεί αν όλες οι συζητήσεις πέσουν στο κενό.

Ως ενδιάμεσα αποτελέσματα μεταξύ των δύο αυτών ακραίων σεναρίων, οι δύο μελετητές θεωρούν όλες τις μικρότερες συμμαχίες που μπορούν να σχηματιστούν ανάμεσα στα διάφορα κράτη.

Μία παράμετρος που εισάγουν οι δύο μελετητές είναι ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των κρατών, ή των περιφερειών, κατά τη σύναψη μιας κλιματολογικής συμφωνίας δεν είναι απαραίτητο να γίνει μόνο με οικονομικούς όρους, ή μόνο υπό μορφή επιδοτήσεων. Μπορεί να μεταφραστεί σε ανταλλαγή τεχνογνωσίας, ή σε από κοινού υλοποίηση έργων υποδομής, ή επίσης με κάποια εμπορική συμφωνία, ή επιπρόσθετα με ανταλλαγή δικαιωμάτων εκπομπής μεταξύ δύο μελών με ανόμοια επίπεδα εκπομπών.

Βέβαια αν έπρεπε να καταταχθεί η συγκεκριμένη προσέγγιση σε μία από τις δύο υπάρχουσες τάσεις, θα λέγαμε ότι κλίνει περισσότερο προς τη στρατηγική της συνεργασίας, υιοθετώντας όμως ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο. Αυτό της δημιουργίας και ενδιάμεσων συμμαχιών πέραν του στόχου της υπερ-συμμαχίας, ο οποίος ηχεί κάπως ουτοπικός.

3.2.3.3 Το ολοκληρωμένο μοντέλο Markal

Το κόστος περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και οι ζημίες λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι δύο καθοριστικοί παράγοντες για την απόφαση της κάθε χώρας. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται η χρήση ενός βαθμονομημένου και αξιόπιστου μοντέλου, που θα εξασφαλίζει τον έγκυρο υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών. Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το παγκόσμιο μοντέλο Markal πολλαπλών περιφερειών (World multi-region Markal model) που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτού του άρθρου.

3.2.3.3.1 Το προηγμένο μοντέλο Markal πολλαπλών περιφερειών

Το Markal είναι ένα δυναμικό μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού που προσδιορίζει τις μερικές ισορροπίες που αφορούν την παραγωγή, πώληση, μετατροπή, διανομή και τελική χρήση διάφορων μορφών ενέργειας αλλά και πρώτων υλών που επηρεάζουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στη συγκεκριμένη μορφή του μοντέλου υπολογίζονται αναλυτικά μόνο οι εκπομπές του CO_2, ενώ οι εκπομπές των υπολοίπων αερίων λαμβάνονται από προηγούμενη έρευνα των δύο μελετητών (Labriet and Loulou (2003)). Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο παρουσιάζει μια μακρά και πλούσια ιστορία όσον αφορά τις εφαρμογές του σε ενεργειακά και περιβαλλοντικά ζητήματα του πλανήτη.

Προσδιορίζει τις πολλαπλές ισορροπίες ανταγωνιστικών ενεργειακών αγορών για το διάστημα 1998-2052, χωρισμένες σε 11 περιόδους πενταετούς διάρκειας. Επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του πλεονάσματος που προκύπτει από τη μείωση των εκπομπών GHG, λαμβάνοντας υπόψη του ενεργειακούς και τεχνολογικούς περιορισμούς.

Βασική του μονάδα είναι η τεχνολογία, που μπορεί να αντιστοιχεί σε οποιαδήποτε διαδικασία παραγωγής, μετατροπής, μεταφοράς και κατανάλωσης ενέργειας ή εκπομπών GHG. Η γραμμική προσέγγιση του Markal (η έξοδος κάθε τεχνολογίας θεωρείται γραμμική συνάρτηση των εισόδων της) επιτρέπει τον προσδιορισμό των ισορροπιών με χρήση του γραμμικού προγραμματισμού. Κάθε τεχνολογία χαρακτηρίζεται από διάφορες τεχνολογικές και οικονομικές μεταβλητές, καθώς και από συντελεστές εκπομπής. Το τεχνολογικό υπόβαθρο του μοντέλου είναι τόσο πλατύ, που η πλήρης περιγραφή του δε μπορεί να γίνει στα πλαίσια της εργασίας. Για περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί κάποιος να ανατρέξει στην εξής ιστοσελίδα (http://www.etsap.org/documentation.asp).

Το μοντέλο καθορίζεται από 42 διαφορετικούς παράγοντες ζήτησης ενέργειας, όπως ο φωτισμός, τα μέσα μεταφοράς, η κατανάλωση σε κατοικίες και εμπορικά κτίρια κ.α. Συνολικά προσομοιώνονται οι 15 περιφέρειες του πίνακα 3.8, οι οποίες έχουν επιλεγεί με πολιτικά, γεωγραφικά και οικονομικά κριτήρια.

Πίνακας 3.8 Οι 15 περιφέρειες προσομοίωσης του μοντέλου Markal

Κωδικός	**Περιφέρεια**
AFR	Αφρική
AUS	Αυστραλία-Νέα Ζηλανδία
CAN	Καναδάς
CSA	Κεντρική και Λατινική Αμερική
CHI	Κίνα
EEU	Ανατολική Ευρώπη
FSU	Πρώην Ε.Σ.Σ.Δ.
IND	Ινδία
JPN	Ιαπωνία
MEX	Μέξικο
MEA	Μέση Ανατολή
ODA	Δυναμικές Ασιατικές Οικονομίες
SKO	Νότια Κορέα
USA	Η.Π.Α.
WEU	Δυτική Ευρώπη

Μεταξύ των περιφερειών θεωρείται ότι υπάρχει αλληλεπίδραση όσον αφορά τον καθορισμό των εξής παραμέτρων : ακατέργαστο πετρέλαιο και παράγωγά του, φυσικό αέριο, άνθρακας, ηλεκτρική ενέργεια, και, δικαιώματα εκπομπών GHG. Όλοι οι ιθύνοντες θεωρείται ότι έχουν τέλεια πληροφόρηση των κινήσεων των υπολοίπων, ενώ οι αγορές

θεωρούνται ανταγωνιστικές, με μοναδική εξαίρεση την παραγωγή του πετρελαίου που καθορίζεται μονομερώς από την OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries).

Για τον προσδιορισμό του συνολικού κόστους μείωσης των εκπομπών, λαμβάνονται υπόψη για κάθε περίοδο προσομοίωσης οι εξής παράγοντες : ετήσιες επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες, ετήσιο κόστος συντήρησης και χειρισμού αυτών των τεχνολογιών, το κόστος αγοράς από τρίτους αλλά και το κόστος εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, οι απώλειες των κρατικών εσόδων από την πιθανή μείωση της τελικής ζήτησης, όλοι οι φόροι και οι επιδοτήσεις που σχετίζονται με την ενέργεια, τις νέες τεχνολογίες, και τις εκπομπές GHG. Στα παραπάνω προστίθενται και οι ζημίες λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως θα φανεί και σε επόμενη ενότητα.

Ως βάση αναφοράς λαμβάνεται το ευρύτατα διαδεδομένο στη βιβλιογραφία σενάριο A1B (Nakicenovic and Swart (2000)), και αυτό καθορίζει τις απαιτούμενες μειώσεις εκπομπών. Θεωρεί σταθερή οικονομική ανάπτυξη και παράλληλα αυξημένη χρήση των νέων τεχνολογιών, με αποτέλεσμα να καταλήγει σε σχετικά χαμηλές εκπομπές. Επειδή οι δύο μελετητές θεωρούν το συγκεκριμένο σενάριο αρκετά αισιόδοξο, δημιούργησαν και ένα εναλλακτικό που μπορεί να ληφθεί ως βάση αναφοράς, και ονομάζεται FOS (Labriet et al.(2005)). Αυτό είναι πιο συγκρατημένο όσον αφορά τη διείσδυση των νέων τεχνολογιών, κυρίως της πυρηνικής αλλά και των ανανεώσιμων πηγών, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αγορά του πετρελαίου θεωρείται ότι θα συνεχίσει να καθορίζεται από το καρτέλ των κρατών που απαρτίζουν την OPEC, και για την προσομοίωση λαμβάνεται υπόψη η εξής προσέγγιση :

a. Κάθε περιφέρεια είναι ελεύθερη να εισάγει απεριόριστο ποσό ακατέργαστου πετρελαίου και κατεργασμένων προϊόντων του, με μία σταθερή, αδιαπραγμάτευτη τιμή. Η εξέλιξη της τιμής λαμβάνεται περίπου ίδια με την πλειονότητα της βιβλιογραφίας , και υπολογίζεται μία ετήσια αύξηση της τιμής ίση με 0,6%, για την περίοδο μεταξύ 2005 και 2050 (Labriet et al.(2005)).
b. Οι εξαγωγές προσαρμόζονται στη συνέχεια για να αντισταθμίσουν τις εισαγωγές στο παγκόσμιο ισοζύγιο, έτσι ώστε τα έσοδα από την αγοραπωλησία του πετρελαίου καθώς και οι εκπομπές CO_2 από την εξαγωγή πετρελαίου να μείνουν ανεπηρέαστες.

Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι οικονομικοί δείκτες του μοντέλου αναφέρονται στις τιμές συναλλάγματος του US $\$_{2000}$, και το προεξοφλητικό επιτόκιο λαμβάνεται ίσο με 5%.

3.2.3.3.2 Υπολογισμός της ισορροπίας Nash με το μοντέλο Markal

Η ιδανική χρήση του μοντέλου Markal προϋποθέτει σε πρώτη φάση τον καθορισμό ενός παγκόσμιου στόχου όσον αφορά τις εκπομπές CO_2, και στη συνέχεια την επίλυση του μοντέλου για την εύρεση των ισορροπιών που ικανοποιούν τον περιορισμό. Φυσικά αυτό απαιτεί τη συνεργασία όλων των περιφερειών.

Στον αντίποδα, στις στρατηγικές μη-συνεργασίας προσδιορίζονται για κάθε χώρα εκείνες οι εκπομπές που εξασφαλίζουν την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κάθε χώρας ή περιφέρειας. Φυσικά πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τόσο οι ζημίες λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και το κόστος περιορισμού των εκπομπών μιας περιφέρειας, επηρεάζονται και από τα επίπεδα εκπομπών των υπόλοιπων περιφερειών.

Το σενάριο αυτό περιγράφεται από την ισορροπία Nash, όπου κάθε χώρα ή περιφέρεια αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους μείωσης των εκπομπών της αλλά και στον περιορισμό των ζημιών λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων, συνυπολογίζοντας τις παγκόσμιες εκπομπές. Με διαφορετικά λόγια αλληλεπίδραση μεταξύ των διάφορων κρατών υπάρχει ακόμη και στις στρατηγικές διαφοροποίησης. Η σωστή μοντελοποίηση αυτών επιβάλλει την ενσωμάτωση των κλιματολογικών ζημιών στο μοντέλο.

Οι δύο μελετητές το πετυχαίνουν αυτό χρησιμοποιώντας τα βασικά στοιχεία μίας μεθόδου που ξεκίνησε από τους Nordhaus και Boyer (1999) και εξελίχθηκε από τον Labriet et al.(2005), η οποία περιλαμβάνει τις εξής προσεγγίσεις :

a. Με ένα απλοποιημένο κλιματολογικό υπομοντέλο υπολογίζεται η μέση ατμοσφαιρική αλλαγή θερμοκρασίας που οφείλεται στις εκπομπές CO_2.
b. Οι ετήσιες περιβαλλοντικές ζημίες θεωρούνται τετραγωνικές συναρτήσεις της μέσης ετήσιας μεταβολής της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας.

Η πιστή εφαρμογή όμως αυτής της μεθόδου προφανώς θα κατέληγε σε ένα μη-γραμμικό μοντέλο, δύσκολο στην επίλυσή του. Σε προηγούμενη όμως εργασία τους (Labriet και Loulou (2003)) οι δύο μελετητές είχαν καταφέρει να αποδείξουν εμπειρικά ότι υπάρχει

γραμμική σχέση μεταξύ των συσσωρευμένων περιφερειακών περιβαλλοντικών ζημιών και των συσσωρευμένων εκπομπών τους, όπως περιγράφεται στη σχέση (3.24). Αυτό το πέτυχαν αθροίζοντας τις ετήσιες ζημίες των περιφερειών, όπως αυτές υπολογίζονται από διάφορα μοντέλα της βιβλιογραφίας, και δείχνοντας με αυτόν τον τρόπο τη γραμμικότητα μεταξύ συνολικών ζημιών και συνολικών εκπομπών.

$$D_i(\sum_{allj} E_j) = a_i \times \sum_{allj} E_j + b_i \tag{3.24}$$

όπου :

$D_i(\sum_{allj} E_j)$ οι συσσωρευμένες περιβαλλοντικές που υφίσταται η περιφέρεια i.

E_i οι συσσωρευμένες εκπομπές της περιφέρειας i από το 2000 έως το 2050.

a_i, b_i χαρακτηριστικοί δείκτες της καμπύλης περιβαλλοντικών ζημιών της περιφέρειας i.

Η γραμμικότητα μεταξύ συσσωρευμένων περιβαλλοντικών ζημιών και περιβαλλοντικών εκπομπών, που δεν αποτελεί υπόθεση αλλά εμπειρική διαπίστωση, έχει σημαντική επίδραση στον προσδιορισμό των ισορροπιών Nash για την περίπτωση της μη-συνεργασίας. Αυτές υπολογίζονται από την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της κάθε χώρας, το οποίο περικλείει τόσο το κόστος περιορισμού των εκπομπών όσο και τις περιβαλλοντικές ζημίες, και περιγράφονται από την παρακάτω συνάρτηση :

$$Min\left\{C_i(X_i, E_i) + D_i(\sum_{allj} E_j)\right\} \tag{3.25}$$

όπου :

$C_i(..)$ το κόστος του ενεργειακού συστήματος της περιφέρειας i.

X_i όλες οι μεταβλητές που επηρεάζουν το κόστος του ενεργειακού συστήματος (επενδύσεις, χειρισμός, κ.α.).

Με δεδομένη τη γραμμικότητα της καμπύλης των ζημιών, οι συνολικές ζημίες της χώρας i μπορούν να γραφτούν ως το άθροισμα των ζημιών που προκαλούνται από τις εκπομπές της χώρας i και από τις εκπομπές των υπολοίπων χωρών j $\neq$ i.

$$D_i(\sum_{allj} E_j) = D_i(E_i) + D_i\left(\sum_{j \neq i} E_j\right) \tag{3.26}$$

Και με δεδομένο ότι ο όρος $D_i(\sum_{j \neq i} E_j)$ δεν επηρεάζεται από καμία μεταβλητή απόφασης της χώρας i, η (3.25) μετατρέπεται ως εξής :

$$\left[a_i \times \sum_{j \neq i} E_j + b_i \right] + Min_i \left\{ C_i(X_i, E_i) + a_i E_i \right\} \tag{3.27}$$

Ο πρώτος όρος του αθροίσματος της σχέσης (3.27) δεν τελεί υπό τον έλεγχο της περιφέρειας i, καθώς δεν καθορίζει εκείνη το ύψος των εκπομπών E_j των υπόλοιπων περιφερειών j. Σε αυτήν απόκειται η ελαχιστοποίηση μόνο του δεύτερου όρου του αθροίσματος, και έτσι η εύρεση της ισορροπίας Nash ανάγεται στην επίλυση 15 ανεξάρτητων γραμμικών προγραμμάτων, ένα για κάθε περιφέρεια i.

3.2.3.3.3 Χαρακτηριστική συνάρτηση του σεναρίου διαφοροποίησης

Ο ορισμός της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κρατών απαιτεί την ανάλυση κάθε πιθανής δομής συμμαχιών του παιγνίου, και συνεπώς και της συμπεριφοράς ακόμη και των περιφερειών που δεν είναι μέλη της εκάστοτε συμμαχίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η γ-χαρακτηριστική συνάρτηση που προτάθηκε από τους Chander και Tulkens (1997) και κάνει την παρακάτω θεώρηση.

Κατά το σχηματισμό μιας συμμαχίας S, τα μη μέλη αυτής δεν υιοθετούν καμία δράση υπέρ ή κατά της συμμαχίας, αλλά ακολουθούν τις στρατηγικές που μεγιστοποιούν τα ίδια οφέλη τους, και απολαμβάνουν το καθαρότερο περιβάλλον που τους προσφέρει η σύσταση της συμμαχίας S. Επιπλέον θεωρείται ότι με την απόσχιση έστω και ενός μέλους, η συμμαχία διαλύεται και τα πρώην μέλη επιλέγουν την ατομική στρατηγική τους Nash. Η γ-χαρακτηριστική συνάρτηση ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$v_\gamma(S) = C_{PANE}(S) - \sum_{i \in S} C_{NASH}(i) \tag{3.28}$$

όπου :

$C_{PANE}(S)$ το συνολικό μειωμένο κόστος της συμμαχίας S υπό τη μερική ισορροπία Nash, όπου όλες οι περιφέρειες της S συνεργάζονται, και αυτές εκτός της S ακολουθούν την ατομική Nash στρατηγική τους.

$C_{NASH}(i)$ το κόστος της περιφέρειας i, που είναι μέλος της συμμαχίας S όταν ακολουθεί την ατομική Nash στρατηγική της.

Η χρήση της συγκεκριμένης χαρακτηριστικής συνάρτησης ουσιαστικά αποκλείει ένα έλλειμμα εκπομπών της συμμαχίας (περισσότερες εκπομπές από τα μη μέλη), καθώς

διαφορετικά η συγκεκριμένη επιλογή θα αποτελούσε ένα είδος αυτοτιμωρίας. Επιπλέον το παίγνιο προσεγγίζει τη σύσταση της S με έναν υψηλό βαθμό απαισιοδοξίας, καθώς η συμμαχία θα είχε πολύ καλύτερα αποτελέσματα αν γινόταν η υπόθεση ότι κάποιες από τις υπόλοιπες περιφέρειες σχημάτιζαν μία έστω ακόμη συμμαχία, και μείωναν περισσότερο τις εκπομπές τους (Chander και Tulkens (1997)).

Το Markal είναι ένα μοντέλο ανοικτού βρόχου, υπό την έννοια ότι οι διαπραγματεύσεις πραγματοποιούνται στην αρχική φάση και διατηρούνται για όλη την περίοδο προσομοίωσης. Και φυσικά η θεώρηση αυτή είναι πλήρως συμβατή τόσο με την αρχική περιγραφή του μοντέλου που αφορά την τέλεια πληροφόρηση αλλά και την πρόβλεψη των κινήσεων όλων των παικτών από τους αντιπάλους τους, όσο και με τη μακροχρόνια φύση των αποφάσεων που αφορούν ενεργειακά ζητήματα.

Έτσι λοιπόν το μοντέλο Markal αποδεικνύεται δυναμικό όσον αφορά τις ενεργειακές αποφάσεις που λαμβάνονται, όμως στατικό από την άποψη των πιθανών κερδών και αλληλεπιδράσεων. Αυτά καθορίζονται απαρχής και δεν υπάρχει η δυνατότητα μελλοντικής επαναδιαπραγμάτευσης.

3.2.3.3.4 Πιθανά σενάρια περιβαλλοντικών ζημιών

Σε προηγούμενη ενότητα περιγράφηκε ο τρόπος υπολογισμού των συσσωρευμένων ζημιών ως συνάρτηση των συσσωρευμένων εκπομπών. Επειδή το επίπεδο αυτών υπόκειται σε μεγάλη αβεβαιότητα , πραγματοποιείται στην ενότητα αυτή ανάλυση ευαισθησίας τόσο των συνολικών ζημιών όσο και των μεγεθών τους ανά περιφέρεια.

Στον πινάκα 3.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Οι συσσωρευμένες ζημίες υπολογίζονται μέχρι το 2100, αντί του 2050 που ολοκληρώνεται η περίοδος προσομοίωσης, ώστε να περιγραφεί με σαφήνεια η μακροχρόνια επίδραση του CO_2. Επέκταση του χρονικού ορίζοντα της ανάλυσης ευαισθησίας δεν έχει έννοια καθώς οι περιβαλλοντικές ζημίες περιορίζονται δραστικά έπειτα από αυτό το χρονικό σημείο. Για παράδειγμα οι συσσωρευμένες ζημίες έως το 2200 είναι μόλις κατά 10% μεγαλύτερες από αυτές του 2100.

Ο ρυθμός μείωσης των περιβαλλοντικών ζημιών λαμβάνεται ίσος με 2%, και έτσι τονίζεται η μεγάλη διάρκεια απόσβεσής τους. Η αλήθεια είναι ότι η σωστή περιγραφή αυτών είναι σχετικά πολύπλοκη λόγω της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει το χρονικό σημείο της εμφάνισής τους, σε αντίθεση με τα κόστη μείωσης των περιβαλλοντικών εκπομπών τα

οποία εμφανίζονται σίγουρα νωρίς. Η επιλογή ενός χαμηλού ρυθμού απόσβεσης των ζημιών από τους δύο μελετητές, πλαταίνει το χρονικό ορίζοντα επίδρασης τους, και κινείται προς την ασφαλή πλευρά καθώς αποτρέπει την υποτίμηση των συνεπειών τους.

Οι περιφέρειες με χαμηλές τιμές ζημιών στον πίνακα 3.9 μπορεί να θεωρηθεί ότι παρουσιάζουν πράγματι χαμηλές ζημίες, ή ότι δε δίνουν τη δέουσα σημασία στις περιβαλλοντικές ζημίες, ή τέλος, ότι έχουν μικρή πολιτική βούληση να δράσουν.

Πίνακας 3.9 Συσσωρευμένες ζημίες (US $ 2000 / tn CO_2) και κατανομή τους ανά περιφέρεια (Πηγή : Labriet, Loulou (2008))

Περιφέρεια	Ζημίες Αναφοράς (REF)	Υψηλές Ζημίες (HI)	Αντίστροφες Ζημίες (REV)
AFR	4,15 (18,2%)	6,36 (12.9%)	1,13 (5.0%)
AUS	0.00 (0.0%)	0,17 (0.3%)	0,22 (1.0%)
CAN	0.01 (0.0 %)	0,37 (0.7%)	0,22 (1.0%)
CHI	0,67 (2,9%)	3,27 (6.6%)	1,36 (6.0%)
CSA	1,83 (8.0 %)	3,29 (6.7%)	0,91 (4.0%)
EEU	0,03 (0.1 %)	0,40 (0.8%)	0,22 (1.0%)
FSU	-0,03 ('-0.1 %)	1,88 (3.8%)	1,59 (7.0%)
IND	3,65%(16.0%)	6,98 (14.2%)	1,13 (5.0%)
JPN	0,31 (1.3%)	1,20 (2.4%)	3,41 (15.0%)
MEA	1,33 (5.8%)	2,27 (4.6%)	0,34 (1.5%)
MEX	0,65 (2.8%)	1,31 (2.6%)	0,34 (1.5%)
ODA	4,14 (18.2%)	7,26 (14.7%)	1,13 (5.0%)
SKO	1,06 (4.6%)	1,82 (3.7%)	0,45 (2.0%)
USA	0,78 (3.4%)	2,77 (5.6%)	5,00 (22.0%)
WEU	4,10 (18%)	9,68 (19.7%)	5,23 (23.0%)
World	22,75 (100%)	49,10 (100%)	22,75 (100%)

Οι ζημίες που περιγράφονται στον πίνακα 3.9 είναι οι εξής :

a. Οι ζημίες αναφοράς προκύπτουν από υπολογισμούς που θεωρούν ετήσιες τετραγωνικές συναρτήσεις κόστους ζημιών ($d_i(t) = a_i \times \Delta T(t)^2$), και προτείνονται από τους Nordhaus και Boyer (1999). Καταλήγουν σε μεγαλύτερες ζημίες για τις αναπτυσσόμενες χώρες σε σχέση με τις βιομηχανικές, με εξαίρεση τη Δυτική Ευρώπη.

b. Στο σενάριο των υψηλών ζημιών, οι ετήσιες συναρτήσεις κόστους ζημιών έχουν τον παράγοντα ΔT(t) υψωμένο στον κύβο. Στην περίπτωση αυτή οι παγκόσμιες ετήσιες ζημίες αντιστοιχούν στο 4,2% του Α.Ε.Π. για μία αύξηση της μέσης ατμοσφαιρικής

θερμοκρασίας κατά 2,5 ^{o}C, αντί του 1,94% για το σενάριο αναφοράς. Και στην περίπτωση αυτή η κατανομή των ζημιών μεταξύ των περιφερειών είναι όμοια με αυτή του προηγούμενου σεναρίου.

c. Οι «αντίστροφες» ζημίες εμπνέονται από τη μεθοδολογία "Calibration I" των Finus et al. (2003) και Fankhauser (1995). Καταλήγουν σε αυξημένες ζημίες για τις αναπτυγμένες χώρες και μικρότερες για τις αναπτυσσόμενες.

Στην προσομοίωση του μοντέλου που γίνεται στη συνέχεια υπολογίζονται οι συσσωρευμένες εκπομπές και για τα τρία αυτά σενάρια, γεγονός που επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

3.2.3.3.5 Προσομοίωση του μοντέλου

Για την προσομοίωση του μοντέλου χρησιμοποιείται η οικογένεια λογισμικών VEDA (Versatile Data Analyst), ο κώδικας είναι γραμμένος στη γλώσσα GAMS (General Algebraic Modeling System, http://www.gams.com), ενώ η επίλυση γίνεται με το πρόγραμμα CPLEX (http://www.ilog.com/products/cplex), κάνοντας χρήση ενός επεξεργαστή PC Pentium 4, 1.8 GHz, 523 Mo.

Η μοντελοποίηση τόσο των στρατηγικών συνεργασίας όσο και διαφοροποίησης πραγματοποιείται «τρέχοντας» μία μόνο φορά το μοντέλο. Αντίθετα ο προσδιορισμός των συμμαχιών με οικονομική αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών τους, είναι πιο χρονοβόρος καθώς απαιτεί τον υπολογισμό των κερδών και οικονομικών ανταλλαγών για κάθε πιθανή συμμαχία. Ο αριθμός των συμμαχιών που μπορούν να σχηματιστούν είναι 15 για 4 παίκτες, 52 για 5 παίκτες, 203 για 6 παίκτες, και αυξάνει ραγδαία για μεγαλύτερο αριθμό παικτών. Η υπόθεση που γίνεται ότι όσες περιφέρειες δε συμμετέχουν σε συμμαχίες ακολουθούν στρατηγική ατομικής βελτιστοποίησης (γ-χαρακτηριστική συνάρτηση), περιορίζει τους παραπάνω αριθμούς σε 15, 31 και 63 για 4, 5 και 6 διαφορετικές περιφέρειες αντίστοιχα.

3.2.3.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και επιχειρείται μία αξιολόγηση των στρατηγικών που ακολουθούν τα διάφορα κράτη, αλλά και των τεχνολογικών αποφάσεων που πρέπει να ληφθούν.

3.2.3.4.1 Κλιματολογικά και οικονομικά αποτελέσματα

Στον πίνακα 3.10 αναφέρονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου Markal. Ως τεχνολογικό σενάριο προσομοίωσης λαμβάνεται το A1B (§3.2.3.3.1), ενώ εξετάζονται όλες οι πιθανές περιπτώσεις για τις συσσωρευμένες ζημίες ((§3.2.3.3.4). Τέλος προστίθεται και ένα ακόμη σενάριο όπου όλες οι φυσικές δεξαμενές απορρόφησης του άνθρακα από την ατμόσφαιρα (π.χ. ωκεανοί) έχουν εξαντληθεί. Οι αρνητικές τιμές που αναφέρονται στην κατηγορία «κόστος ενεργειακού συστήματος» αναπαριστούν το κόστος λόγω των απαιτούμενων αλλαγών στο χώρο της ενέργειας, ενώ οι θετικές τιμές για την παράμετρο «ζημίες» περιγράφουν τα οφέλη από τη μείωση των περιβαλλοντικών ζημιών.

Από τον πίνακα 3.10 γίνεται φανερό ότι η ισορροπία Nash είναι πολύ πιο κοντά στο B.A.U. σενάριο απ' ότι στη βέλτιστη περίπτωση της παγκόσμιας συνεργασίας. Συγκεκριμένα οι μειώσεις των συσσωρευμένων εκπομπών στην ισορροπία Nash, υπό το σενάριο A1B-REF, αντιστοιχεί μόλις στο 21% των μειώσεων που θα υπήρχαν στην περίπτωση της συνεργασίας των περιφερειών. Αυτό μάλλον καταδεικνύει ένα διεθνή χαρακτήρα του προβλήματος, στον οποίο συνηγορούν και οι Eyckmans και Tulkens (2003), ενώ διαφωνούν οι Hackl και Pruckner (2002), όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Πίνακας 3.10 Αποτελέσματα οικονομικών και κλιματικών αλλαγών (Πηγή : Labriet, Loulou (2008))

	A1B-REF Ζημίες Αναφοράς	**A1B-HI** Υψηλές Ζημίες	**A1B-REV** Αντίστροφη κατανομή Ζημιών	**A1B-REV** Εξάντληση δεξαμενών άνθρακα
Οφέλη της στρατηγικής συνεργασίας σε σχέση με τη στρατηγική διαφοροποίησης (Gross$_{\$2000}$DPV)				
Σύνολο παγκόσμια	11,395.0	27,780.5	12,104.1	9,007.2
Κόστος ενεργειακού συστήματος	-7,182.4	-14,527.7	-7,150.0	-5,131.4
Ζημίες	18577.4	42,308.2	19,254.1	14,138.6
Σύνολικές εκπομπές το 2050 (Gt C)				
BAU	17.0	17.0	17.0	17.0
NASH	15.0	13.0	14.8	15.5
COOP	7.3	5.9	7.3	9.6
Συγκέντρωση CO_2 το 2050 (ppm)				
BAU	514.4	514.4	514.4	514.4
NASH	497.1	481.9	499.3	500.2
COOP	432.5	414.7	432.5	451.1
Αύξηση θερμοκρασίας το 2050 (^oC)				
BAU	1.60	1.60	1.60	1.60
NASH	1.55	1.50	1.56	1.56
COOP	1.33	1.25	1.33	1.39

Μικρές σχετικά είναι οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο στρατηγικών και όσον αφορά την αύξηση της θερμοκρασίας (1,60 ^{o}C στο B.A.U.- 1,55 ^{o}C στο σενάριο ισορροπίας Nash) ενώ η περίπτωση της καθολικής συνεργασίας απέχει σημαντικά από αυτές τις δύο (μόλις 1,33 ^{o}C). Η διαφορά ανάμεσα στο συνολικό όφελος που προκύπτει αν οι περιφέρειες συνεργαστούν πλήρως, και στο όφελος που υπάρχει στην περίπτωση της ισορροπίας Nash, ισούται μόλις με το 3,5% του οφέλους από την συνεργασία.

Επίσης διαπιστώνεται ότι το παγκόσμιο όφελος στην περίπτωση της συνεργασίας των κρατών εξαρτάται πρωτίστως από τη διαφορά στο μέγεθος των ετήσιων ζημιών (REF-HI σενάρια) και ελάχιστα από τον τρόπο κατανομής τους μεταξύ των περιφερειών (REF-REV cases).

Επιπλέον τονίζεται η τεράστια σημασία των φυσικών δεξαμενών απορρόφησης άνθρακα του πλανήτη, καθώς η απουσία τους περιορίζει κατά 21% τα παγκόσμια συνολικά οφέλη. Τέλος, τα οφέλη από τη μείωση των κλιματολογικών επιπτώσεων ξεπερνούν για καθεμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις το κόστος μείωσης των εκπομπών, και το ισοζύγιο παραμένει θετικό.

Εκείνο που αξίζει σχολιασμό είναι ότι θεωρώντας υψηλότερες τις σημερινές εκπομπές, αυξάνονται και τα πιθανή οφέλη από των περιορισμό αυτών, και τελικά προκύπτουν και χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Ωστόσο η περίπτωση αυτή δυσκολεύει και τη δημιουργία αμοιβαίων συμφωνιών, καθώς πρέπει να επιτευχθούν πολύ μεγάλες μειώσεις εκπομπών από όλα τα κράτη, πράγμα όχι και τόσο εύκολο.

Το παραπάνω γεγονός αποτελεί ένα παράδοξο, καθώς όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος του οφέλους προς το κόστος από τις μειώσεις των εκπομπών, τόσο υψηλότερα είναι τα κίνητρα διαφοροποίησης, που μάλιστα γίνονται ακόμη πιο ισχυρά όσο αυξάνονται τα κέρδη της πιθανής συνεργασίας.

3.2.3.4.2 Ενεργειακά και τεχνολογικά αποτελέσματα

Το Markal είναι σε θέση να προτείνει συγκεκριμένα μέτρα, που περιορίζουν αρκετά το κόστος μείωσης των εκπομπών. Συγκεκριμένα η ποσότητα CO_2 που δεσμεύεται από μεγάλες υδάτινες επιφάνειες αλλά και δασικές εκτάσεις, ισοδυναμεί με τις μισές μειώσεις εκπομπών που προβλέπεται να πραγματοποιηθούν κατά το έτος 2050 με βάση τις

προσομοιώσεις στρατηγικών είτε συνεργασίας, είτε διαφοροποίησης. Η προστασία των ωκεανών από τη ρύπανση και των δασών από την υλοτόμηση αποτελεί αναγκαιότητα.

Επιπλέον η χρήση γεννητριών συνδυασμένου κύκλου αερίου (CCGT-combined cycle gas turbine) που έχει ήδη ξεκινήσει να εφαρμόζεται, μπορεί να αποτελέσει το ενδιάμεσο στάδιο για τη μετάβαση σε τεχνολογίες εκμετάλλευσης εξελιγμένων ορυκτών όπως το Solid oxide fuel cell (SOFC), που αποφεύγουν τη χρήση ανθρακικών παραγώγων. Βέβαια οι επενδύσεις σε έρευνα που απαιτούνται, ενδέχεται να κάνουν την τεχνολογία SOFC λιγότερο προσιτή σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, όπως την IGCC (Integrated coal-gasification combined cycle) που επίσης παρουσιάζει μεγάλες προοπτικές.

Στον πίνακα 3.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του Markal που αφορούν την τελική ενεργειακή κατανάλωση ανά κατηγορία. Σε σχέση με τα αρχικά επίπεδα και ανεξαρτήτως ακολουθούμενης στρατηγικής, στον κλάδο της βιομηχανίας παρατηρείται μείωση ποσοστών του άνθρακα και του πετρελαίου και αύξηση του ηλεκτρισμού. Στην εμπορική και οικιακή κατανάλωση αυξάνεται πολύ το ποσοστό του ηλεκτρισμού και μειώνεται αυτό της βιομάζας. Στις μεταφορές μειώνεται σημαντικά η χρήση του πετρελαίου και αυξάνεται κυρίως το ποσοστό της βιομάζας, αλλά και του υδρογόνου και του φυσικού αερίου. Τέλος στη γεωργία δεν σημειώνονται αξιόλογες αλλαγές των καταναλισκόμενων μορφών ενέργειας.

Πίνακας 3.11 Παγκόσμιες τελικές καταναλώσεις ενέργειας ανά κατηγορία (Πηγή : Labriet, Loulou (2008))

	2000	2050				2000	2050		
Ποσοστό	ALL(%)	BAU(%)	NOCO (%)	COOP(%)	Ποσοστό	ALL(%)	BAU(%)	NOCO (%)	COOP(%)
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ					**ΕΜΠΟΡΙΚΗ & ΟΙΚΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ**				
Βιομάζα	4.8	3.9	4.1	5.4	Βιομάζα	28.9	2.9	3.0	3.5
Άνθρακας	18.9	7.7	7.3	3.4	Άνθρακας	4.8	6.9	7.0	3.7
Φυσικό αέριο	28.2	37.6	38.2	26.4	Φυσικό αέριο	23.0	13.5	13.9	14.1
Θερμική ενέργεια	0.8	0.5	0.7	3.3	Θερμική ενέργεια	5.5	1.6	1.6	1.6
Πετρέλαιο	30.8	23.0	22.5	17.4	Πετρέλαιο	15.4	16.5	16.5	12.4
Ηλεκτρισμός	15.2	26.4	26.4	39.7	Ηλεκτρισμός	22.2	57.9	57.1	63.6
Άλλα	1.3	0.9	0.9	4.4	Άλλα	0.2	0.7	0.8	1.1
ΓΕΩΡΓΙΑ					**ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ**				
Βιομάζα	3.0	3.8	3.8	3.8	Βιομάζα	0.4	11.2	11.5	31.2
Άνθρακας	8.9	6.2	6.2	6.2	Άνθρακας	0.0	0.0	0.0	0.0
Φυσικό αέριο	10.9	2.6	2.6	2.6	Φυσικό αέριο	1.9	12.4	12.4	12.3
Θερμική ενέργεια	7.6	2.5	2.5	2.5	Υδρογόνο	0.0	12.4	12.4	12.3
Πετρέλαιο	51.9	65.1	65.1	65.1	Πετρέλαιο	96.8	58.5	58.2	38.7
Ηλεκτρισμός	17.6	19.8	19.8	19.8	Ηλεκτρισμός	0.9	5.6	5.6	5.5

Επίσης φαίνεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η συνεργασία των περιφερειών μπορεί να προκαλέσει αξιοσημείωτες διαφορές. Συγκεκριμένα στον τομέα των μεταφορών τα βιοκαύσιμα (31.2%) προκρίνονται ως η βέλτιστη λύση για την αντικατάσταση του πετρελαίου. Αντίθετα η ηλεκτρική ενέργεια, το φυσικό αέριο και το υδρογόνο παραμένουν σχεδόν αμετάβλητα σε σχέση με το σενάριο B.A.U. Το υδρογόνο αυξάνει το ποσοστό του και όπως εκτιμάται από μερίδα της βιβλιογραφίας (Riahi and Roehrl (2000)) θα ασκήσει μεγαλύτερη επιρροή στο δεύτερο μισό του αιώνα, όταν το ηλιακό και πυρηνικό υδρογόνο αναμένεται να αντικαταστήσουν το υδρογόνο που παράγεται από το φυσικό αέριο.

Όσον αφορά τους υπόλοιπους τελικούς καταναλωτές, η αντικατάσταση του πετρελαίου και του άνθρακα από φυσικό αέριο, υδρογόνο και ηλεκτρισμό ισχυροποιείται στη βιομηχανία, σε σχέση πάντα με το BA.U. σενάριο, ενώ δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στους εμπορικούς και οικιακούς καταναλωτές και φυσικά καμία μεταβολή στον κλάδο της γεωργίας.

3.2.3.5 Διανομή του παγκόσμιου οφέλους

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια προσπάθεια εύρεσης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κρατών, που διασφαλίζουν τη σταθερότητα της υπερ-συμμαχίας. Το πλεόνασμα που πετυχαίνει η υπερ-συμμαχία σε σχέση με το σενάριο διαφοροποίησης, το οποίο περιγράφεται με την ισορροπία Nash, πρέπει να διανέμεται στα μέλη της με κατάλληλο τρόπο.

Αυτές οι ανταλλαγές ή επιδοτήσεις αποτελούν το αντισταθμιστικό όφελος στην προσπάθεια που κατέβαλλαν οι περιφέρειες για τη μείωση των εκπομπών τους σε CO_2. Στην προσπάθεια εύρεσης του βέλτιστου κανόνα διανομής οι δύο μελετητές χρησιμοποίησαν τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες αναφέρονται εν συντομία παρακάτω. Για την εύρεση αναλυτικότερης περιγραφής τους μπορεί κάποιος να ανατρέξει στις πηγές που παρατίθενται στη συνέχεια αλλά και στο παράρτημα του άρθρου των Labriet και Loulou, (2008). Οι κανόνες λοιπόν που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής :

1. Ο κανόνας διανομής της τιμής Shapley (Shapley (1953)), ή SV, προσφέρει σε κάθε παίκτη ένα όφελος που αντιστοιχεί στη μέση συμβολή του για το σχηματισμό κάθε πιθανής υπο-συμμαχίας. Η τιμή Shapley στηρίζεται στον κανόνα της αναλογικότητας και της αξιοκρατικής ανταμοιβής, και θεωρεί ότι καθένας πρέπει να λαμβάνει αντίστοιχα με όσο προσφέρει.

2. Ο κανόνας Nucleolus (Schmeidler (1969)), ή NU, θεωρεί ότι το πλεόνασμα της συμμαχίας θα πρέπει να προσφέρεται κατά προτεραιότητα στα πιο αδύναμα μέλη της συμμαχίας.
3. Ο κανόνας Germain-Toint-Tulkens (Germain et al (1999)), ή GTT, προτείνει σε πρώτη φάση την πληρωμή από κάθε περιφέρεια ενός ποσού ίσου με το πρόσθετο όφελος που έχει από την ένταξή της στη συμμαχία σε σχέση με αυτό που θα είχε αν ακολουθούσε στρατηγική διαφοροποίησης. Στη συνέχεια κάθε κράτος θα λαμβάνει ένα αντίτιμο ανάλογο με τις οριακές περιβαλλοντικές του ζημίες
4. Ένας κανόνας διανομής που προκύπτει εξισώνοντας τα συνολικά κόστη μείωσης. των περιφερειών αναλογικά με το Α.Ε.Π. τους (TAC) . Με αυτήν την προσέγγιση κάθε περιφέρεια προσφέρει στη συμμαχία, αλλά και ανταμείβεται από αυτήν, ανάλογα με τις οικονομικές της δυνατότητες. Το συνολικό κόστος μείωσης ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του κόστους που δαπανήθηκε εντός της συμμαχίας μείον αυτού που θα σπαταλούσε κάθε περιφέρεια αν ακολουθούσε την ατομική Nash στρατηγική της. Σε αυτό περιλαμβάνονται τόσο οι περιβαλλοντικές ζημίες όσο και το κόστος ενεργειακού συστήματος.

3.2.3.5.1 Αριθμός των παικτών και πιθανά σενάρια

Ο προσδιορισμός των βέλτιστων διανομών απαιτεί τον υπολογισμό των κερδών κάθε πιθανής συμμαχίας του παιγνίου. Προκειμένου να περιοριστεί ο όγκος των πράξεων σε λογικά επίπεδα ώστε να είναι εφικτή και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, οι 15 περιφέρειες χωρίστηκαν σε 4 ομάδες, και οι πιθανές συμμαχίες είναι 15.

Οι Η.Π.Α. και οι χώρες της Δυτικής Ευρώπης δεν συνενώθηκαν με άλλες περιφέρειες λόγω της υψηλής διαπραγματευτικής τους δύναμης, των υψηλών εκπομπών τους, αλλά και την τάση που έχουν να πορεύονται αυτόνομα. Με DC συμβολίζεται η ένωση των αναπτυσσόμενων περιφερειών (AFR, CSA,CHI, IND, MEX,MEA, ODA), που διεκδικούν την περαιτέρω ανάπτυξή τους πριν δεσμευτούν για τις μειώσεις των εκπομπών τους. Με OCD+ περιγράφεται η ένωση όλων των υπόλοιπων περιφερειών (AUS,CAN,JPN, SKO, EEU,FSU), που περιλαμβάνει τις υπόλοιπες OECD χώρες αλλά και τις χώρες με διακυμάνσεις στην οικονομία τους.

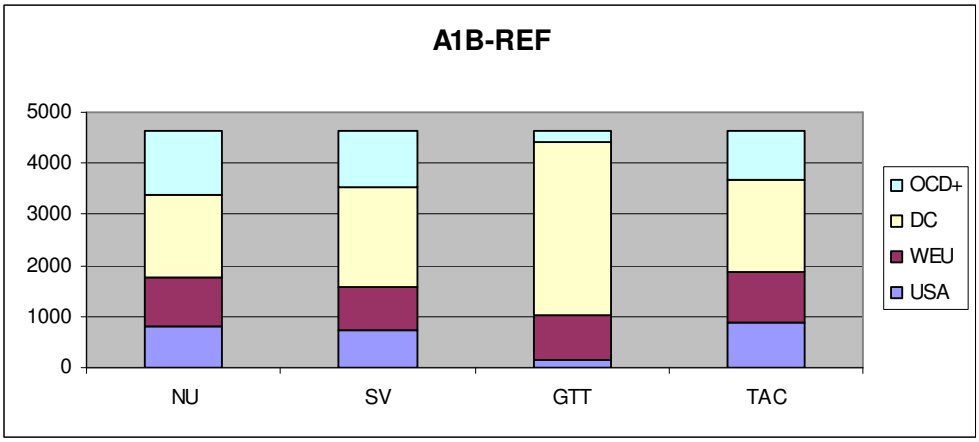
Αρκετές από τις χώρες των συμμαχιών OCD+ και OECD έχουν συμπορευτεί και στο παρελθόν, και φυσικά αυτό προσδίδει στο παίγνιο μεγαλύτερα επίπεδα συνεργασίας σε σχέση με την προσομοίωση των 15 ανεξάρτητων περιφερειών. Ωστόσο η συνύπαρξη τόσο πολλών

διαφορετικών παικτών δυσκολεύει πολύ την εύρεση μιας κοινής στρατηγικής που θα αποτελεί τη βέλτιστη λύση για όλους τους συμμετέχοντες.

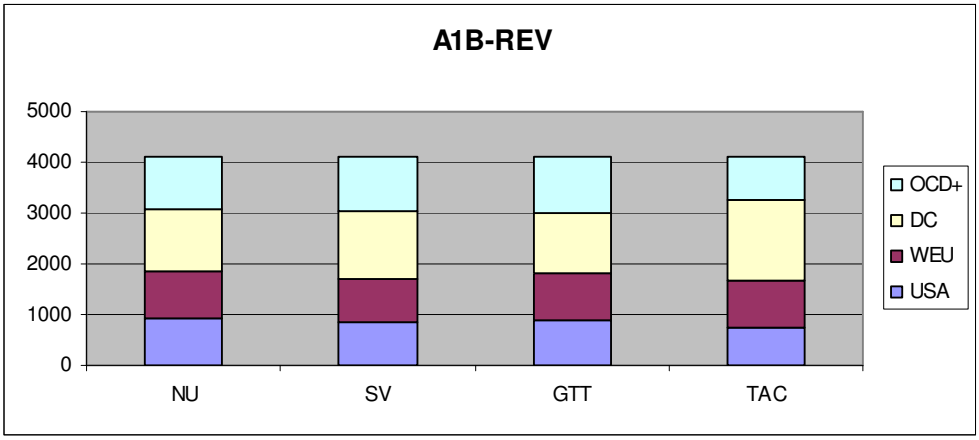
Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι η DC αντιπροσωπεύει μία ισχυρή περιφέρεια τόσο από την άποψη του μεγέθους των σημερινών της εκπομπών, όσο και από τις μεγάλες προοπτικές που παρουσιάζει για τη μείωση αυτών, εξαιτίας του χαμηλού οριακού κόστους που τις χαρακτηρίζει. Σημαντικότατη είναι και η επιρροή που μπορεί να ασκήσει στη χάραξη περιβαλλοντικών πολιτικών, η οποία είχε σαν αποτέλεσμα την αποχώρηση των Η.Π.Α. από τη συνθήκη του Kyoto.

3.2.3.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με τη διανομή του κέρδους και τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις περιφέρειες

Στο γράφημα 3.13 παρουσιάζεται η κατανομή των συνολικών κερδών της συμμαχίας στις περιφέρειες με βάση τους τέσσερις κανόνες διανομής που περιγράφηκαν στην §3.2.3.5, και θεωρώντας δύο διαφορετικά σενάρια περιβαλλοντικών ζημιών. Για το σενάριο A1B-REF τα συνολικά κέρδη είναι 4635 (G$2000 DPV) ενώ για το σενάριο A1B-REV 4127 (G$2000 DPV) σε σχέση πάντα με το άθροισμα των κερδών που θα είχε η κάθε περιφέρεια αν ακολουθούσε την ατομική Nash στρατηγική της.



Γράφημα 3.13 (a) Κατανομή του οφέλους που προκύπτει από τη συνεργασία αντί της διαφοροποίησης. Σενάριο A1B-REF (Πηγή : Labriet, Loulou (2008)).



Γράφημα 3.13 (b) Κατανομή του οφέλους που προκύπτει από τη συνεργασία αντί της διαφοροποίησης . Σενάριο A1B-REV (Πηγή : Labriet, Loulou (2008))

Τα κατανεμημένα κέρδη του γραφήματος αντιστοιχούν στα τελικά οφέλη της κάθε περιφέρειας, αφού συνυπολογιστούν και οι ανταλλαγές μεταξύ των περιφερειών εντός της συμμαχίας. Οι τελευταίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.12 για τα δύο σενάρια περιβαλλοντικών ζημιών, αλλά και για τους τέσσερις κανόνες διανομής.

Πίνακας 3.12 Ανταλλαγές μεταξύ των περιφερειών (G$2000 Discounted Present Value και % ποσοστό των ανταλλαγών) (Πηγή : Labriet, Loulou (2008))

Σενάριο	*Κανόνας*	*USA*	*WEU*	*DC*	*OCD+*	*Ανταλλαγές*
A1B-REF	**NU**	1493 (48%)	-28 (-1%)	-3077 (-99%)	1612 (52%)	3106
	SV	1405 (47%)	-119 (-4%)	-2837 (-96%)	1552 (52%)	2957
	GTT	792 (52%)	-116 (-8%)	-1414 (-92%)	739 (48%)	1532
	TAC	1521 (52%)	99 (3%)	-2968 (-100%)	1348 (45%)	2968
A1B-REV	**NU**	-424 (-26%)	-769 (-48%)	1591 (100%)	-397 (-24%)	1591
	SV	-522 (-29%)	-846 (-47%)	1785 (100%)	-416 (-23%)	1786
	GTT	-488 (-29%)	-754 (-46%)	1636 (100%)	-393 (-24%)	1637
	TAC	-605 (-29%)	-767 (-37%)	2083 (100%)	-710 (-34%)	2083

Αρχικά να σημειωθεί ότι και οι τέσσερις κανόνες διανομής που χρησιμοποιήθηκαν, εξασφαλίζουν σε όλους τους παίκτες οφέλη ίσα ή μεγαλύτερα από αυτά που θα αποκόμιζαν αν ακολουθούσαν στρατηγικές διαφοροποίησης. Μία γενική παρατήρηση των μελετητών κατά την προσομοίωση του μοντέλου είναι ότι όσο μεγαλύτερη ασυμμετρία παρουσιάζουν τα μέλη μιας συμμαχίας, τόσο υψηλότερα είναι τα κίνητρα διαφοροποίησης αλλά και

περισσότερες οι μορφές αλληλεπίδρασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, πέραν της οικονομικής.

Από μία πρώτη ανάγνωση του γραφήματος 3.13 γίνεται αντιληπτό ότι ο βέλτιστος κανόνας διανομής για την πιο πολυμελή περιφέρεια, τη DC, είναι ο GTT , ο οποίος γενικά ευνοεί τις περιφέρειες με υψηλές περιβαλλοντικές ζημίες. Ωστόσο, και λόγω του ότι είναι ο πλέον ανομοιογενής μεταξύ των τεσσάρων, είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει αποδεκτός από τους υπόλοιπους παίκτες. Εκτός του GTT, η περιφέρεια DC θα προτιμούσε και τον κανόνα SV, ο οποίος πρεσβεύει τον αναλογικό καταμερισμό των κερδών με βάση τη συμβολή του κάθε παίκτη στην επίτευξη του στόχου. Η DC αναλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης των συνολικών εκπομπών, δεδομένου και του χαμηλού οριακού κόστους που παρουσιάζει.

Οι υπόλοιπες τρεις περιφέρειες – USA, OCD+, WEU – επωφελούνται από τον κανόνα NU ο οποίος ευνοεί περιφέρειες με υψηλά οριακά κόστη μείωσης των εκπομπών και μικρά οφέλη από τις εφαρμοζόμενες κλιματολογικές πολιτικές. Τέλος ο κανόνας διανομής TAC, που εξασφαλίζει την εξίσωση των περιφερειακών κερδών ανά Α.Ε.Π. με τα παγκόσμια οφέλη ανά Α.Ε.Π., ευνοεί τις περιφέρειες DC και WEU, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλά Α.Ε.Π. συγκριτικά με τις άλλες.

Όσον αφορά τον πίνακα 3.12, φαίνεται ξεκάθαρα ότι πρωτίστως η περιφέρεια DC και σε μικρότερο βαθμό η WEU, πληρώνουν τις USA και OCD+ για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της παγκόσμιας συμμαχίας. Το υψηλότερο επίπεδο ανταλλαγών, υπό το σενάριο περιβαλλοντικών ζημιών A1B-REF, παρατηρείται με τον κανόνα διανομής NU ενώ το χαμηλότερο με τον κανόνα GTT που όπως προαναφέρθηκε είναι και ο πιο ανομοιογενής.

Με το σενάριο A1B-REV η κατάσταση διαφοροποιείται σημαντικά. Τόσο το πλεόνασμα της συμμαχίας όσο και το επίπεδο των ανταλλαγών περιορίζονται σημαντικά. Μάλιστα οι χρηματοροές αλλάζουν και κατεύθυνση, και ο δότης στο προηγούμενο σενάριο, δηλαδή η περιφέρεια DC, γίνεται πλέον δέκτης. Παρότι βέβαια το μοντέλο δεν έχει άλλους σκοπούς πέραν της μείωσης των εκπομπών, με τη χρήση του σεναρίου A1B-REV γίνεται και αποκατάσταση της οικονομικής ανισότητας καθώς οι πλούσιες περιφέρειες του πλανήτη (USA, WEU, OCD+) ενισχύουν τις φτωχότερες (DC).

Συνεπώς φαίνεται ότι το Markal είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στη μεταβολή του σεναρίου κλιματικών επιπτώσεων. Λαμβάνοντας υπόψη και τον πίνακα 3.9, παρατηρείται ότι η περιφέρεια για την οποία εκτιμάται σε κάθε σενάριο ότι θα παρουσιάσει τις υψηλότερες ζημίες, είναι αυτή που τελικά αποκομίζει μεγαλύτερα οφέλη από τη δημιουργία μιας συμμαχίας που πετυχαίνει σημαντικές μειώσεις εκπομπών. Παράλληλα όμως οφείλει να

διασφαλίσει τη σταθερότητα της συμμαχίας αυτής, και έτσι αναλαμβάνει το ρόλο του δότη στις μεταξύ των μελών ανταλλαγές.

Μία ακόμη παρατήρηση από τη διαδικασία της προσομοίωσης είναι ότι το κόστος κάθε υπο-συμμαχίας μειώνεται αν τα εξωγενή μέλη σχηματίσουν και αυτά άλλες υπο-συμμαχίες αντί να πορευτούν αυτόνομα. Το παραπάνω αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, καθώς μικρότερες παγκόσμιες εκπομπές προκαλούν μικρότερες ζημίες. Η διαπίστωση αυτή ίσως πρέπει να εξεταστεί με σοβαρότητα από τους αρμόδιους, οι οποίοι προσπαθούν μάταια για τη δημιουργία μιας υπερ-συμμαχίας, αδιαφορώντας για τα ευεργετικά αποτελέσματα που θα μπορούσε να έχει η πιο εύκολη δημιουργία υπο-συμμαχιών αντί μίας παγκόσμιας (Finus (2004)).

3.2.3.6 Συμμαχίες χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η πιθανότητα δημιουργίας ενδιάμεσων συμμαχιών, μικρότερων της υπερ-συμμαχίας, χωρίς οικονομική συσχέτιση των μελών της. Αν αυτές μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητικές μειώσεις των παγκόσμιων εκπομπών CO_2, τότε μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη χάραξη των περιβαλλοντικών πολιτικών, δεδομένης και της οικειοθελούς προσχώρησης των μελών σε αυτές. Για την απλότητα της ανάλυσης θεωρείται ότι κανένα μέλος που αποσχίζεται από τη συμμαχία δε μπορεί να επιστρέψει σε αυτή.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και θεωρώντας ως κριτήριο απόφασης για την απόσχιση από μια συμμαχία τα περιφερειακά κόστη (κόστος ενεργειακού συστήματος και δαπάνες) που προκύπτουν για κάθε πιθανή υπο-συμμαχία, σχηματίζεται ο πίνακας 3.13 που εξετάζει τη σταθερότητα της υπερ-συμμαχίας.

Πίνακας 3.13 Ανάλυση σταθερότητας της υπερ-συμμαχίας. (Labriet, Loulou (2008))

A1B-REF					
Κόστος ανά περιφέρεια (G$2000 DPV)					
Συμμαχία	***Αποστάτης***	***USA***	***WEU***	***DC***	***OCD+***
{WEU,DC,OCD+,USA}	Κανένας	59.342	53.657	147.902	52.353
{WEU,DC,OCD+}	USA	58.525	54.121	149.620	52.526
{DC,OCD+}	USA,WEU	58.610	53.995	150.628	52.388
{WEU,OCD+}	USA,DC	58.659	54.328	151.326	51.830
{WEU,DC}	USA,OCD+	58.668	54.705	151.740	51.825
{Καμία}	ΟΛΟΙ	58.711	54.610	152.669	51.900

Μία πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι για κάθε περιφέρεια εκτός από τη DC υπάρχει ένα τουλάχιστον καλύτερο σενάριο από την υπερ-συμμαχία. Η DC αποτελεί μία ειδική περίπτωση καθώς εκτός από χαμηλό οριακό κόστος παρουσιάζει και υψηλές οριακές ζημίες. Έτσι είναι προτιμότερο για αυτήν να παραμείνει στη συμμαχία και να πείσει τα εναπομείναντα μέλη να περιορίσουν ακόμη περισσότερο τις εκπομπές τους. Αντίθετα για τους υπόλοιπους παίκτες είναι προτιμότερο να αποχωρήσουν και να μην επωμιστούν αυτοί τις υψηλές ζημίες τις DC.

Από μία καλύτερη ανάγνωση του πίνακα φαίνεται ότι ανεξαρτήτως των κινήσεων των υπολοίπων οι Η.Π.Α. επωφελούνται από την αποχώρησή τους από την υπερ-συμμαχία, καθώς επιβαρύνονται με το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο σενάριο. Μετά λοιπόν την αποχώρηση των Η.Π.Α. η συμμαχία αποτελείται από τις {WEU,DC,OCD+}. Η OCD+ πλέον έχει κάθε λόγο να αποχωρήσει, αφού επιβαρύνεται με το μέγιστο δυνατό ίδιο κόστος. Τελικά και η WEU υποχρεούται και αυτή να εγκαταλείψει, διότι επιβαρύνεται με χαμηλότερο κόστος αν πορευτεί με βάση την ατομική Nash στρατηγική της.

Από τις προσομοιώσεις που έκαναν οι δύο μελετητές και για το σύνολο των 15 περιφερειών διαπιστώθηκαν αντίστοιχα αποτελέσματα. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι δεν είναι δυνατή η δημιουργία ενδιάμεσων σταθερών συμμαχιών χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση των μελών τους.

Τέλος ένα ακόμη ενδιαφέρον στοιχείο που προέκυψε είναι ότι η ενδιάμεση συμμαχία των USA και WEU, υπό το σενάριο των περιβαλλοντικών ζημιών A1B-REV, αποδεικνύεται εσωτερικά σταθερή χωρίς οικονομική συσχέτιση των μελών της. Η παρατηρούμενη μείωση των εκπομπών είναι βέβαια πολύ μικρή (μόλις το 10% των μειώσεων από την παγκόσμια συμμαχία). Μάλιστα διαπιστώθηκε ότι η αύξηση των περιβαλλοντικών ζημιών σε περιφέρειες με υψηλό οριακό κόστος μείωσης των εκπομπών, ενισχύει τη σταθερότητα της υπερ-συμμαχίας. Αυτό είναι άλλωστε αναμενόμενο καθώς σε διαφορετική περίπτωση το κίνητρο απόσχισης είναι μεγάλο για παίκτες με μικρές ατομικές ζημίες, οι οποίοι καλούνται να πληρώσουν για την κάλυψη των παγκόσμιων ζημιών και τη διατήρηση της παγκόσμιας συμμαχίας.

3.2.4 "New Roads to International Environmental Agreements :The Case of Global Warming"

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή της εργασίας των Michael Finus, Johan Eyckmans (2004). Αποτελεί ίσως την πιο ενδιαφέρουσα εργασία από πλευράς αποτελεσμάτων, ανάμεσα σε μία σειρά δημοσιευμένων άρθρων κυρίως του πρώτου μελετητή (π.χ. Finus(2003a); Finus (2003b), κ.α.), και έρχεται ως συνέχεια της τελευταίας αναζήτησης της προηγούμενης ενότητας.

Εξετάζεται δηλαδή η πιθανότητα δημιουργίας πολλαπλών και ενδιαμέσων συμμαχιών, καθώς και πόσο σταθερές και αποδοτικές μπορούν να είναι αυτές. Η ανάλυση θα περιοριστεί κυρίως στην παρουσίαση και το σχολιασμό των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, παραθέτοντας μόνο τις βασικές και θεμελιώδεις αρχές του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, και αποφεύγοντας επαναλήψεις παρεμφερών ορισμών και εννοιών που έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες.

3.2.4.1 Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης

Ο σχηματισμός των συμμαχιών μοντελοποιείται ως ένα παίγνιο που διεξάγεται σε δύο φάσεις. Αρχικά οι παίκτες αποφασίζουν αν θα συμμετάσχουν στις σχηματιζόμενες συμμαχίες, και στη συνέχεια τα μέλη της συμμαχίας αποφασίζουν για τα επίπεδα μείωσης των εκπομπών τους. Οι δύο βασικές υποθέσεις που κάνει το μοντέλο αναφέρονται παρακάτω.

Πρώτον, η πλειονότητα της βιβλιογραφίας εξετάζει τον σχηματισμό μιας μόνο συμμαχίας και έτσι οι παίκτες καλούνται να αποφασίσουν αν θα ενταχθούν σε αυτή ή θα πορευτούν αυτόνομα, χωρίς όμως να έχουν την επιλογή να δημιουργήσουν μία άλλη συμμαχία. Ελάχιστοι όμως έχουν μελετήσει την πιθανότητα σύναψης πολλαπλών συμφωνιών αντί μίας και μοναδικής, καθώς επίσης και αν οι πρώτες είναι προτιμότερες από την άποψη των περιβαλλοντικών και οικονομικών αποτελεσμάτων.

Εκείνοι που το επιχείρησαν (Carraro (2000); Carraro and Marchiori (2003); Finus (2001); Finus and Rundshagen (2003)) διαπίστωσαν ότι είναι δυνατόν να προκύψει ισορροπία με πολλαπλές συμμαχίες. Ωστόσο τα αποτελέσματα τους ήταν περιορισμένης ισχύος, εξαιτίας της μελέτης μόνο συμμετρικών παικτών αλλά και άλλων απλουστεύσεων

που εισήγαγαν (στατική προσέγγιση υπολογισμού των κερδών και εξέταση μόνο κυρίαρχων στρατηγικών).

Έτσι η συγκεκριμένη εργασία εμφανίζεται από τις πρώτες του είδους που επιχειρεί να αναλύσει την επίδραση των πολλαπλών συμμαχιών αντί της μίας και μοναδικής. Άλλωστε υπάρχουν βάσιμες εικασίες στην επιστημονική κοινότητα ότι οι πολλαπλές συμμαχίες θα συμβάλλουν στον καλύτερο περιβαλλοντικό έλεγχο. Χώρες με κοινά συμφέροντα και επιδιώξεις μπορούν να συνασπιστούν και έτσι και το κίνητρο διαφοροποίησης θα εκλείψει λόγω της ομοιογένειας που παρουσιάζουν οι νέοι σχηματισμοί.

Επίσης ορισμένες χώρες οι οποίες αρνούνταν μέχρι τώρα να προσχωρήσουν στο εγχείρημα της παγκόσμιας συμμαχίας επειδή το θεωρούσαν ουτοπικό, είναι πιθανό να συνεργαστούν με ανάλογα σκεπτόμενα κράτη για μια μικρότερη και πιο ρεαλιστική μείωση των εκπομπών. Ίσως τελικά αν η δημιουργία μιας μεγάλης σταθερής συμμαχίας δεν είναι εφικτή, οι μικρές περιφερειακές συμφωνίες αποτελέσουν τη βέλτιστη εναλλακτική.

Η δεύτερη υπόθεση που γίνεται και διαφοροποιεί τη συγκεκριμένη εργασία από τις υπόλοιπες είναι ότι μέχρι τώρα η ένταξη στη συμμαχία ήταν ανοικτή. Κάθε εξωτερικός παίκτης μπορούσε να διεισδύσει, αν έκρινε ότι είναι προς το συμφέρον του, και να διαταράξει της ισορροπίες στο εσωτερικό αυτής, προκαλώντας ίσως και τη διάλυσή της.

Και αυτό εφαρμόζεται και στην πραγματικότητα καθώς όλες οι υπάρχουσες περιβαλλοντικές συμφωνίες είναι ανοικτής συμμετοχής. Για παράδειγμα το πρωτόκολλο του Kyoto δεν απαιτεί καμία ψηφοφορία για την ενσωμάτωση κάποιας χώρας σε αυτό. Αντίθετα επιτυχημένες συμμαχίες όπως το NATO (North Atlantic Treaty Organization) και η Ε.Ε. (Ευρωπαϊκή Ένωση) απαιτούν την ομόφωνη έγκριση από όλα τα μέλη τους. Ίσως τελικά να είναι και αυτός ένας λόγος αποτυχίας σύναψης μιας αποτελεσματικής παγκόσμιας συμφωνίας.

Οι δύο μελετητές ακολουθώντας την ασφαλή οδό, εισάγουν τους παρακάτω δύο κανόνες αποκλειστικής συμμετοχής :

a. Τον ***κανόνα αποκλειστικής συμμετοχής με πλειοψηφική εκλογή*** (exclusive membership majority voting). Ο κανόνας αυτός υπαγορεύει ότι μόνο αν το 50% των μελών ψηφίσει θετικά, το υποψήφιο νέο μέλος μπορεί να ενταχθεί στη συμμαχία.

b. Τον ***κανόνα αποκλειστικής συμμετοχής με ομόφωνη εκλογή*** (exclusive membership unanimity voting). Ο κανόνας αυτός υπαγορεύει ότι μόνο αν όλα τα μέλη συμφωνήσουν, η συμμαχία θα διευρυνθεί.

Με βάση τις δύο αυτές παραδοχές και χρησιμοποιώντας το παγκόσμιο μοντέλο CLIMNEG, γίνεται ο προσδιορισμός των ισορροπιών σταθερών συμμαχιών, και η αξιολόγηση αυτών με βάση τα οφέλη που εξασφαλίζουν, τα επίπεδα μείωσης των εκπομπών και τις τελικές συγκεντρώσεις CO_2 στην ατμόσφαιρα.

Οι περιφέρειες που προσομοιώνονται είναι οι Η.Π.Α. (USA), η Ιαπωνία (JPN), η Ευρωπαϊκή Ένωση (EU), η Κίνα (CHN), η Ε.Σ.Σ.Δ. (FSU) και οι υπόλοιπες χώρες του πλανήτη (ROW), που προφανώς δεν είναι συμμετρικοί παίκτες. Η συνολική περίοδος προσομοίωσης είναι 350 έτη, και οι πιθανές σχηματιζόμενες συμμαχίες είναι 203.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δε θα γίνει περαιτέρω παρουσίαση του μοντέλου CLIMNEG. Πρόκειται για ένα μοντέλο που αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου RICE των Nordhaus και Young (1996) και για πιο αναλυτική περιγραφή του μπορεί κάποιος να ανατρέξει στο άρθρο των Eyckmans και Tulkens (2003).

3.2.4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στους πίνακες 3.14 και 3.15 αναφέρονται οι σταθερές δομές συμμαχιών με, και χωρίς, οικονομική συσχέτιση των παικτών αντίστοιχα. Σε κάθε δομή συμμαχιών αντιστοιχεί ένας αριθμός μεταξύ 1 και 203, που αναγράφεται στην $1^{η}$ στήλη. Η δομή με το νούμερο 1 περιγράφει την ισορροπία Nash, όπου κάθε παίκτης είναι ανεξάρτητος, ενώ η δομή με το νούμερο 203 συμβολίζει την υπερ-συμμαχία. Το νούμερο 196 είναι η πρώτη συμμαχία του Kyoto πριν την αποχώρηση των Η.Π.Α., ενώ το νούμερο 87 είναι χωρίς τις Η.Π.Α. Εκτός από τη σταθερότητά τους οι συγκεκριμένες ισορροπίες έχουν επιλεγεί γιατί αποτελούν και σημεία αναφοράς στον καθορισμό της παγκόσμιας περιβαλλοντικής πολιτικής.

Στη $2^{η}$ στήλη αναγράφονται τα μέλη που απαρτίζουν τις διάφορες συμμαχίες, ενώ στην $3^{η}$, $4^{η}$ και $5^{η}$ στήλη παρατίθεται η πληροφορία σχετικά με τη σταθερότητα των δομών αυτών (n = μη σταθερή, y = σταθερή, "-"=δεν προσδιορίζεται) σε παίγνιο απλών (S) και πολλαπλών (M) συμμαχιών, που η συμμετοχή είναι είτε ανοικτή (OM), είτε αποκλειστική με πλειοψηφική (EM-MV) ή ομόφωνη εκλογή (EM-UV).

Στην 6η στήλη φαίνονται τα συνολικά προεξοφλητικά κέρδη των έξι περιφερειών για τη συνολική περίοδο (1990-2330) και με βάση αυτά τοποθετούνται οι δομές συμμαχιών κατά φθίνουσα σειρά, στην 8η στήλη οι συνολικές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις GHG στο τέλος της περιόδου, ενώ στη 10η στήλη οι συσσωρευμένες παγκόσμιες εκπομπές για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Για την ευκολότερη αξιολόγηση των συμμαχιών έχουν εισαχθεί στον πίνακα δείκτες μέτρησης της εξωτερικότητας (DEX). Αυτοί προσδιορίζουν τη διαφορά μεταξύ του συνολικού κέρδους της υπερ-συμμαχίας και μιας οποιαδήποτε δομής c, και την εκφράζουν ως ποσοστό της πρώτης. Εξ ορισμού για την περίπτωση της δομής νο.1 το ποσοστό αυτό είναι μηδενικό. Στις στήλες 7, 9 και 11 απεικονίζονται οι δείκτες κέρδους, ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης και εκπομπών αντίστοιχα.

Από μια πρώτη ανάγνωση των δύο πινάκων κάποια σημεία φαντάζουν περίεργα. Πολλές συμμαχίες απαρτίζονται από μέλη, τα οποία θεωρούνται αρνητικά προς οποιαδήποτε συνεργασία, και πολύ περισσότερο με συμμάχους αυτούς των πινάκων 3.14 και 3.15. Για παράδειγμα στην περίπτωση των δομών χωρίς οικονομική συσχέτιση, είναι απρόσμενη η συμμετοχή της ROW σε μια συμφωνία με τις ΗΠΑ, με την οποία έχουν εντελώς διαφορετικά συμφέροντα. Ωστόσο για κάθε ένα από αυτά τα παράδοξα υπάρχει η κατάλληλη εξήγηση.

Πρώτον, οι εκτιμήσεις των περιβαλλοντικών ζημιών ανά περιφέρεια γίνονται με το τροποποιημένο μοντέλο RICE, και δε συμβαδίζουν απόλυτα με την πλειονότητα της βιβλιογραφίας. Για παράδειγμα για τις αναπτυσσόμενες χώρες θεωρείται ότι η απόφαση τους δεν επηρεάζεται τόσο από τις περιβαλλοντικές τους ζημίες, αλλά από τις προοπτικές για οικονομική ανάπτυξη που τους προσφέρονται. Θα περίμενε λοιπόν κάποιος το κόστος τους που σχετίζεται με τις κλιματικές αλλαγές να είναι μικρό, όμως το εφαρμοζόμενο μοντέλο δείχνει μεγάλο κόστος παρότι έχει θεωρηθεί υψηλότερο ρυθμό μείωσης των ζημιών για τις ROW και CHN σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες.

Δεύτερον, υπάρχει μία φημολογία ότι οι χώρες που συμμαχούν, μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές τους σε σχέση με το BAU και τους ανεξάρτητους παίκτες, και έτσι συνεισφέρουν αποφασιστικά στο κοινό καλό. Τα πράγματα δεν είναι ωστόσο έτσι ακριβώς. Ειδικότερα αν θεωρηθεί ότι δύο περιφέρειες με υψηλό οριακό κόστος και χαμηλές οριακές ζημίες συνασπίζονται, τότε η μεγιστοποίηση του οφέλους τους προκύπτει από μέτριες μειώσεις εκπομπών. Αντίθετα ένας μοναχικός παίκτης με χαμηλό οριακό κόστος μείωσης εκπομπών και υψηλές οριακές περιβαλλοντικές ζημίες, προβαίνει ούτως ή άλλως σε σημαντικές μειώσεις εκπομπών, που είναι και προς το δικό του συμφέρον.

Πίνακας 3.14 Σταθερές δομές συμμαχιών χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση (Πηγή : Finus, Eyckmans (2004))

No. (1)	Δομή Συμμαχιών (2)	OM (3)		EM-MV (4)		EM-UV (5)		Όφελος (6) (billion 1990US $)	DEX (7)	Συγκέντρωση (8) (billion tons C)	DEX (9)	Εκπομπές (10) (billion tons C)	DEX (11)
		S	M	S	M	S	M						
203	{USA,JPN,EU,CHN,FSU,ROW}	n	n	n	n	n	n	339,830.726	0.00	1,912.907	0.00	772.529	0.0
26	{USA,FSU,ROW},{EU},{CHN},{JPN}	n	n	n	n	y	y	339,134.977	0.21	3,411.761	78.35	1,228.558	59.03
156	{USA,JPN,ROW},{EU},{CHN},{FSU}	n	n	n	n	y	y	339,105.160	0.21	3,455.612	80.65	1,240.635	60.59
155	{USA,JPN},{EU,ROW},{CHN},{FSU}	-	n	-	y	-	y	339,088.903	0.22	3,469.536	81.38	1,245.867	61.27
4	{EU,ROW},{USA},{JPN},{CHN},{FSU}	n	n	y	n	y	n	339,077.348	0.22	3,474.433	81.63	1,247.764	61.52
20	{JPN,FSU,ROW},{USA},{EU},{CHN}	n	n	n	n	y	y	339,019.753	0.24	3,648.097	90.71	1,299.488	68.21
6	{USA,ROW},{EU},{JPN},{CHN},{FSU}	n	n	y	y	y	y	339,018.374	0.24	3,622.360	89.36	1,292.177	67.27
153	{USA,JPN},{FSU,ROW},{EU},{CHN}	-	n	-	y	-	y	338,907.856	0.27	3,839.731	100.73	1,358.172	75.81
2	{FSU,ROW},{USA},{JPN},{EU},{CHN}	n	n	y	n	y	n	338,895.952	0.28	3,844.839	100.99	1,360.210	76.07
5	{JPN,ROW},{USA},{EU},{CHN},{FSU}	n	n	y	y	y	y	338,882.175	0.28	3,898.367	103.79	1,373.392	77.78
196	{USA,JPN,EU,FSU},{CHN},{ROW}	n	n	n	n	n	n	338,149.623	0.49	4,508.541	135.59	1,575.837	103.98
87	{JPN,EU,FSU},{USA},{CHN},{ROW}	n	n	n	n	n	n	338,111.881	0.51	4,530.523	136.84	1,584.988	105.17
1	{USA},{JPN},{EU},{FSU},{CHN},{ROW}	y	n	y	n	y	n	338,059.826	0.52	4,550.202	137.87	1,593.398	106.26

Πίνακας 3.15 Σταθερές δομές συμμαχιών με οικονομική αλληλεπίδραση (Πηγή : Finus, Eyckmans (2004))

No. (1)	Δομή Συμμαχιών (2)	OM (3)		EM-MV (4)		EM-UV (5)		Όφελος (6) (billion 1990US $)	DEX (7)	Συγκέντρωση (8) (billion tons C)	DEX (9)	Εκπομπές (10) (billion tons C)	DEX (11)
		S	M	S	M	S	M						
203	{USA,JPN,EU,CHN,FSU,ROW}	n	n	n	n	n	n	339,830.726	0.00	1,912.907	0.00	772.529	0.0
31	{USA,ROW},{EU,CHN},{JPN},{FSU}	-	n	-	y	-	y	339,378.119	0.13	3,185.380	70.96	1,184.793	53.37
46	{JPN,CHN},{EU,ROW},{USA},{FSU}	-	y	-	y	-	y	339,365.727	0.17	3,270.385	70.96	1,184.793	53.37
28	{EU,CHN},{FSU,ROW},{USA},{JPN}	-	n	-	y	-	y	339,249.498	0.17	3,420.970	78.84	1,229.317	59.13
30	{JPN,ROW},{EU,CHN},{USA},{FSU}	-	n	-	n	-	y	339,234.553	0.18	3,477.957	81.80	1,243.367	60.95
4	{EU,ROW},{USA},{JPN},{CHN},{FSU}	y	n	y	n	y	n	339,077.348	0.22	3,474.433	81.63	1,247.764	61.52
117	{USA,EU},{CHN,ROW},{JPN},{FSU}	-	n	-	y	-	y	339,054.455	0.23	3,971.249	107.60	1,380.521	78.70
3	{CHN,ROW},{USA},{EU},{JPN,{FSU}}	y	n	y	n	y	n	339,026.549	0.24	3,986.954	108.42	1,386.628	79.49
6	{USA,ROW},{EU},{JPN},{CHN},{FSU}	y	n	y	n	y	n	339,018.374	0.24	3,622.360	89.36	1,292.177	67.27
2	{FSU,ROW},{USA},{JPN},{EU},{CHN}	y	n	y	n	y	n	338,895.952	0.28	3,844.839	100.99	1,360.210	76.07
5	{JPN,ROW},{USA},{EU},{CHN},{FSU}	y	n	y	n	y	n	338,882.175	0.28	3,898.367	103.79	1,373.392	77.78
196	{USA,JPN,EU,FSU},{CHN},{ROW}	n	n	n	n	n	n	338,149.623	0.49	4,508.541	135.69	1,575.837	103.98
87	{JPN,EU,FSU},{USA},{CHN},{ROW}	n	n	n	n	n	n	338,111.881	0.51	4,530.523	136.84	1,584.988	105.17
1	{USA},{JPN},{EU},{FSU},{CHN},{ROW}	y	n	y	n	y	n	338,059.826	0.52	4,550.202	137.87	1,593.398	106.26

Τρίτον, πρέπει να τονιστεί ότι έκτος από το επίπεδο μείωσης των εκπομπών που αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ένταξη σε μια συμμαχία, ένα ακόμη κριτήριο που επηρεάζει την απόφαση του κάθε παίκτη άλλα και εγγυάται την εσωτερική σταθερότητα είναι η ύπαρξη ομοειδών κινήτρων. Και ειδικά για την περίπτωση των σχηματισμών χωρίς οικονομική συσχέτιση των μελών τους, όμοια κίνητρα προκύπτουν από όμοια οριακά κόστη και όμοιες οριακές ζημίες.

Ωστόσο είναι πιθανό μία περιφέρεια τύπου-1 (π.χ.ROW), με σχετικά χαμηλό οριακό κόστος και υψηλές οριακές ζημίες, και μία περιφέρεια τύπου-2 (π.χ. JPN), με ακριβώς αντίστροφα ποιοτικά χαρακτηριστικά, να εισπράττουν αμοιβαία οφέλη από τη συνεργασία τους. Η πρώτη συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών και αμείβεται ανάλογα για αυτό, ενώ η δεύτερη πράττει το αντίστροφο. Δηλαδή τα οφέλη κατανέμονται αναλογικά με τη συμβολή των μελών. Σε τέτοιες συμμαχίες μπορεί να ταιριάξει και μια περιφέρεια τύπου-3 (π.χ.USA και FSU) με ενδιάμεσα οριακά κόστη και ζημίες. Έτσι εξηγείται γιατί οι USA, JPN, FSU, ROW είναι πολύ συχνά μέλη σταθερών δομών συμμαχιών του πίνακα 3.14.

Αντίθετα μια περιφέρεια τύπου-4 (π.χ.EU) με σχετικά υψηλά οριακά κόστη και ζημίες, είναι δύσκολο να βρει συμμάχους. Και αυτό γιατί συνεισφέρει λίγο, όμως επωφελείται δυσανάλογα πολύ. Επιπλέον πιέζει για την επίτευξη υψηλών μειώσεων εκπομπών στις συμμαχίες που είναι μέλος λόγω των υψηλών οριακών ζημιών της, αρά και των αυξημένων κερδών από τη βελτίωση της περιβαλλοντικής κατάστασης. Αυτός είναι ο λόγος που η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι μέλος συμμαχίας σε μόλις δύο από τις σταθερές δομές του πίνακα 3.14.

Τέλος μία περιφέρεια τύπου-5 (π.χ. CHN) με χαμηλό οριακό κόστος και χαμηλές οριακές ζημίες θα ήταν επιθυμητό μέλος, ωστόσο δεν έχει η ίδια κίνητρο ένταξης, και για αυτό δεν εμφανίζεται ως μέλος κάποιας συμμαχίας σε καμία από τις σταθερές δομές του πίνακα 3.14. Η κατάσταση όμως διαφοροποιείται στην περίπτωση των οικονομικών αλληλεπιδράσεων του πίνακα 3.15 και τα συμφέροντα εξισορροπούνται. Πλέον η Κίνα αμείβεται ανάλογα με τη μεγάλη της συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών λόγω του χαμηλού οριακού κόστους της, και μαζί με την ROW αποτελούν τους πιο θελκτικούς συμμάχους.

Τέταρτον, οι δομές συμμαχιών που προκύπτουν χαρακτηρίζονται όχι μόνο από την εσωτερική, αλλά και από την εξωτερική σταθερότητα τους. Έτσι, υπό τον κανόνα της ανοικτής συμμετοχής, ή και σε κάποιο βαθμό από τον κανόνα της αποκλειστικής συμμετοχής

με πλειοψηφική εκλογή, οι συμμαχίες που περιλαμβάνουν την Κίνα δεν είναι σταθερές λόγω του κινήτρου των υπολοίπων να ενταχθούν σε αυτές.

3.2.4.2.1 Αξιολόγηση των σταθερών δομών συμμαχιών

Ένα από τα πρώτα συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι ότι ανεξαρτήτως κανόνα συμμετοχής η υπερ-συμμαχία αποδεικνύεται ασταθής. Άλλωστε όπως φαίνεται από υπολογισμούς των μελετητών, οι περιφέρειες CHN και ROW πετυχαίνουν μεγαλύτερα κέρδη ακόμη κι όταν πορεύονται αυτόνομα.

Ωστόσο η μειωμένη κερδοφορία δεν είναι ο μόνος παράγοντας αστάθειας. Εξίσου σημαντικές είναι οι αυξημένες μειώσεις εκπομπών που απαιτούνται στην περίπτωση της παγκόσμιας συνεργασίας. Μάλιστα η απόσχιση των μελών από την συμμαχία είναι ελκυστική, καθώς συνεπάγεται μια μεγάλη μείωση του κόστους εκπομπών και μια μέτρια αύξηση των περιβαλλοντικών ζημιών. Και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο πιο πολυμελής είναι η συμμαχία, τόσο μεγαλύτερο είναι και το κίνητρο διαφοροποίησης.

Επίσης φαίνεται ότι τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη συμφωνία του Kyoto δε γεφυρώνουν το χάσμα ανάμεσα στη βέλτιστη λύση και την ισορροπία Nash, ενώ πολλές άλλες δομές συμμαχιών τα καταφέρνουν πολύ καλύτερα. Με βάση αυτά τα στοιχεία ίσως θα ήταν προτιμότερο μόνο ένα μέρος της συμμαχίας του Kyoto να διατηρηθεί και να επιδιώξει τη συνεργασία και με άλλα μέλη, ακόμη και αν χρειαστεί να τους παρέχει οικονομικά κίνητρα.

Παράλληλα γίνεται αντιληπτό ότι ο αυξημένος αριθμός μελών δεν εγγυάται την επιτυχία της συμμαχίας. Έτσι η πρώτη συμφωνία του Kyoto (νο.196) που αριθμεί τέσσερα μέλη είναι ασταθής και υποδεέστερη από την άποψη οικονομικών και οικολογικών όρων, από πολλές άλλες συμμαχίες που προκύπτουν με, και χωρίς, οικονομική αλληλεπίδραση. Αντίστοιχα η δομή νο.4 με μόλις μία διμελή συμμαχία, είναι επικρατέστερη των δομών νο.20, με μία τριμελή, και νο. 153, με δύο διμελείς συμμαχίες, και όλες τους είναι σταθερές σε ένα παίγνιο πολλαπλών συμμαχιών αποκλειστικής συμμετοχής με πλειοψηφική εκλογή και χωρίς ανταλλαγές.

Τέλος μπορεί να γίνει μια αποτίμηση και σύγκριση των τριών ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που εισάγει η συγκεκριμένη προσέγγιση.

Α. Ανοικτή ή αποκλειστική συμμετοχή

Από τον πίνακα 3.14 , διαπιστώνεται ότι καμία δομή συμμαχιών με ανοικτή συμμετοχή δεν είναι σταθερή, μόνο λίγες με αποκλειστική συμμετοχή και πλειοψηφική εκλογή είναι σταθερές, και αρκετά περισσότερες με ομόφωνη εκλογή. Και αυτά ισχύουν τόσο σε παίγνια απλών, όσο και πολλαπλών συμμαχιών, χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση. Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι στις ισορροπίες αυτές επιτυγχάνονται υψηλά κέρδη και χαμηλά επίπεδα εκπομπών και συγκεντρώσεων GHG, γεγονός που καταδεικνύει τη σημασία αυτών των σχηματισμών. Ανάλογα συμπεράσματα εξάγονται και για την ύπαρξη οικονομικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παικτών.

Και το σπουδαιότερο σημείο είναι ότι η αποκλειστική συμμετοχή φαίνεται να πλεονεκτεί έναντι της ανοικτής συμμετοχής, και συγκριμένα τα αποτελέσματα είναι ακόμη καλύτερα με χρήση της ομόφωνης εκλογής για την ένταξη ενός μέλους. Πολλοί βέβαια ισχυρίζονται ότι ο αυξημένος βαθμός συμφωνίας μεταξύ των μελών είναι πιθανό να προκαλεί χαλάρωση και υποβάθμιση των στόχων, τα αποτελέσματα ωστόσο δείχνουν ότι το επιχείρημα αυτό είναι αβάσιμο, καθώς οι μειώσεις εκπομπών που επιτυγχάνονται είναι μάλιστα πολύ μεγαλύτερες.

Β. Απλές ή πολλαπλές συμμαχίες

Αρχικά παρατηρείται ότι σαφέστατα προκύπτουν ισορροπίες πολλαπλών συμμαχιών, αρκεί να είναι επιτρεπτό από τη δομή του παιγνίου. Επιπλέον στην περίπτωση οικονομικής αλληλεπίδρασης, οι τέσσερις πιο κερδοφόρες δομές περιλαμβάνουν πολλαπλές συμμαχίες. Και τέλος επιβεβαιώνεται η εικασία ότι οι περιφέρειες που δεν έχουν κίνητρο ένταξης σε μία συγκεκριμένη συμμαχία, θα δημιουργήσουν μια καινούρια, εφόσον αυτό είναι εφικτό και βέλτιστο κατά Paretto.

Για παράδειγμα η δομή νο.2 ({FSU,ROW},{USA},{JPN},{EU},{CHN}) είναι σταθερή σε ένα παίγνιο απλών συμμαχιών με αποκλειστική συμμετοχή, και χωρίς οικονομικές αλληλεπιδράσεις. Με τη μετατροπή όμως του παιγνίου σε πολλαπλών συμμαχιών γίνεται ασταθής, καθώς οι USA και JPN έχουν κίνητρο να συμμαχήσουν και έτσι προκύπτει η δομή νο.153 ({USA,JPN},{FSU,ROW},{EU},{CHN}). Μάλιστα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι δεν επωφελούνται μόνο οι ίδιες αλλά και οι υπόλοιπες περιφέρειες. Αντίστοιχη είναι η σχέση και με τα ζεύγη ισορροπιών (νο.4, νο.155), και με την εισαγωγή οικονομικής αλληλεπίδρασης για τα ζεύγη (νο.5, νο.30), (νο.6, νο.31),

(νο.3, νο.117), και, (νο.4, νο.46). Προφανώς η άρση του περιορισμού για μια και μοναδική συμφωνία θα ήταν ευεργετική.

Έτσι λοιπόν διαπιστώνεται ότι η δημιουργία ισορροπιών πολλαπλών συμμαχιών είναι πιθανή τόσο μεταξύ συμμετρικών όσο και μεταξύ ανομοιογενών παικτών. Και το στοιχείο αυτό αυξάνει το ενδιαφέρον των κρατών για συνεργασίας. Επιβεβαιώνεται και η πρόσφατη τάση που υπάρχει στις διεθνείς περιβαλλοντικές συσκέψεις για την υπογραφή διαφορετικών πρωτοκόλλων ανά κατηγορία κρατών. Ίσως τελικά αυτός να είναι ο σωστός δρόμος για την επιτυχή έκβαση των διαπραγματεύσεων.

Γ. Με ή χωρίς οικονομική συσχέτιση

Η σύγκριση των πινάκων 3.14 και 3.15 δείχνει ότι οι τέσσερις πρώτες σταθερές δομές σε ένα παίγνιο πολλαπλών συμμαχιών, με αποκλειστική συμμετοχή και οικονομική αλληλεπίδραση (νο.31, νο.46, νο.28, νο.30), είναι πιο επικερδείς από την αντίστοιχη βέλτιστη δομή χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση (νο.26). Και στην περίπτωση αυτή αποδεικνύεται ότι οι ανταλλαγές αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο, που όμως δε μπορεί να αντισταθμίσει πλήρως τα κίνητρα διαφοροποίησης και να επιτύχει αποτελέσματα ίδια με αυτά της υπερ-συμμαχίας.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε πλήρη συμφωνία με τα ευρήματα αντίστοιχων μελετών της βιβλιογραφίας και δικαιώνουν τις προσπάθειες που έγιναν στο συνέδριο του Montreal αλλά και στο πιο πρόσφατο του Kyoto για την παροχή επιδοτήσεων προς τις αναπτυσσόμενες περιφέρειες.

3.3 Αξιολόγηση των μοντέλων και αναζήτηση της βέλτιστης λύσης

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αξιολόγηση των μοντέλων που περιγράφηκαν στις προηγούμενες. Πρέπει να αναφερθεί ότι τόσο η επιλογή όσο και η σειρά παρουσίασης των άρθρων έγινε με σκοπό τη βέλτιστη απεικόνιση και καταγραφή των τάσεων και των εξελίξεων που υπάρχουν γύρω από το συγκεκριμένο πρόβλημα την τελευταία περίπου δεκαπενταετία.

3.3.1 Η εξέλιξη των περιβαλλοντικών συμφωνιών

Η πρώτη σύνοδος του Kyoto πραγματοποιήθηκε στις 11 Δεκεμβρίου 1997, αφού είχαν προηγηθεί η σύνοδος του Βερολίνου (1995) και της Γενεύης (1996), όπου συμμετείχαν 37 κράτη (ANNEX I), μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα (http://unfccc.int). Εκεί ετέθησαν τα θεμέλια της πρώτης περιβαλλοντικής συμφωνίας, καθώς και ο αντικειμενικός στόχος που ήταν η συνολική μείωση κατά 5,2% των εκπομπών των μελών για την περίοδο 2008-2012, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Στη σύνοδο συμμετείχαν μόνο αναπτυγμένες χώρες ή χώρες με μεταβατικές οικονομίες, και έτσι σε επόμενο στάδιο ήταν αναγκαία και η παρουσία κρατών με αναπτυσσόμενες οικονομίες αλλά και υψηλά επίπεδα εκπομπών, όπως για παράδειγμα η Κίνα και η Ινδία.

Όπως είναι γνωστό από το 1995 πραγματοποιούνται ετήσιες σύνοδοι (Conference of the Parties-COP) όπου συζητούνται η πρόοδος και οι αλλαγές στα περιβαλλοντικά ζητήματα. Από το 2005 και έπειτα, παράλληλα με την COP πραγματοποιείται και η συνάντηση των μελών της συνόδου του Kyoto (Meeting of the Parties-MOP). Έτσι η συνάντηση που έγινε στο Montreal το 2005 και ήταν ίσως η μεγαλύτερη περιβαλλοντική συνάντηση με περισσότερους από 10.000 συμμετέχοντες, συμβολίζεται με COP11/MOP1.

Επίσης πριν γίνει μία συνοπτική περιγραφή των αποτελεσμάτων των διάφορων συνόδων πρέπει να αναφερθεί η επίσημη κατηγοριοποίηση των συμμετεχόντων κρατών σύμφωνα με την UNFCCC, που είναι η εξής :

a. **ANNEX 1**. Περιλαμβάνει κράτη με αναπτυγμένες ή μεταβατικές οικονομίες. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται και η Ελλάδα. Στόχος είναι η μείωση των εκπομπών τους, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.
b. **ANNEX 2**. Αποτελεί υποσύνολο του ANNEX 1 και περιέχει αναπτυγμένες χώρες που πρέπει να επιδοτήσουν τις αναπτυσσόμενες, για την επίτευξη του περιβαλλοντικού στόχου. Συμπεριλαμβάνουν τα μέλη της OECD και εξαιρούν τις

οικονομίες που ήταν σε μετάβαση πριν το 1992. Και σε αυτήν την κατηγορία εντάσσεται η Ελλάδα.

c. **Αναπτυσσόμενες χώρες**. Δεν έχουν καμία υποχρέωση μείωσης των εκπομπών τους, αν δε λάβουν αντίστοιχη οικονομική και τεχνολογική στήριξη από τις αναπτυγμένες χώρες. Οι λόγοι για τη μη θέσπιση συγκεκριμένων περιορισμών για αυτές ήταν οι εξής :
    - Δεν πρέπει να περιοριστεί η ανάπτυξή τους, και όπως είναι γνωστό οι εκπομπές GHG συνδέονται άμεσα με τη βιομηχανική παραγωγή.
    - Μπορούν να πωλούν δικαιώματα εκπομπών σε άλλα κράτη που δε μπορούν να πετύχουν το στόχο τους, κι έτσι υπάρχει αυξημένη ευελιξία.
    - Λαμβάνουν οικονομική αλλά και τεχνολογική βοήθεια για την επένδυση σε νέες τεχνολογίες με μικρή κατανάλωση άνθρακα.

Με δεδομένο ότι η επιτυχία ενός μοντέλου κρίνεται από το βαθμό που καταφέρνει να προσομοιώσει τις πραγματικές καταστάσεις έχει σημασία να περιγραφούν οι σύνοδοι που πραγματοποιήθηκαν την τελευταία δεκαετία και τα αποτελέσματά τους :

- **1998, COP 4, Buenos Aires**. Αναμενόταν να επιλυθούν σε αυτήν τα ζητήματα που είχαν μείνει σε εκκρεμότητα από τη συνθήκη του Kyoto, κάτι που δεν επετεύχθη. Ως θετικό καταγράφηκε η συμμετοχή της Αργεντινής και του Kazakhstan, των πρώτων χωρών εκτός ANNEX 1, που δεσμευτήκαν να προβούν σε μειώσεις των εκπομπών τους.
- **1999, COP 5, Bonn**. Στη σύνοδο ανταλλάχθηκαν τεχνολογικές απόψεις. Δεν υπήρξε καμία άλλη εξέλιξη.
- **2000, COP 6, Hague**. Οι Η.Π.Α. πρότειναν να συμπεριληφθούν στις μετρήσεις μείωσης των εκπομπών της κάθε χώρας, και οι φυσικές αποσβέσεις των GHG από τις δασικές της εκτάσεις και τις φυτικές καλλιέργειες. Το αίτημα απορρίφθηκε κατά πλειοψηφία και η σύνοδος στέφθηκε με αποτυχία.
- **2001, COP 6 bis, Bonn**. Πραγματοποιήθηκε για να συζητηθούν τα θέματα που είχαν μείνει σε εκκρεμότητα από τη σύνοδο της Χάγης. Συνέπεσε με την εκλογή στην κυβέρνηση των Η.Π.Α. του George W. Bush, και την άρνησή του να επικυρώσει το πρωτόκολλο του Kyoto. Έτσι οι Η.Π.Α. είχαν το ρόλο του απλού παρατηρητή σε αυτήν τη σύνοδο, στην οποία ωστόσο επετεύχθησαν και συμφωνίες σε ουσιώδη ζητήματα. Για παράδειγμα οι αναπτυγμένες χώρες θα μπορούσαν να ισοσταθμίσουν πιθανή μικρότερη μείωση των εκπομπών τους με μεγαλύτερες επιδοτήσεις στις αναπτυσσόμενες χώρες. Επίσης δραστηριότητες όπως η αναδάσωση θα πιστωνόταν

ως μειώσεις των εκπομπών. Η πώληση δικαιωμάτων εκπομπών συμφωνήθηκε να περιοριστεί, καθώς και να δημιουργηθεί νέο πλαίσιο για την παροχή οικονομικής ενίσχυσης. Παρότι απροσδόκητο, η σύνοδος ήταν επιτυχής.

- **2001, COP 7, Marrakech, Morocco.** Έγιναν οι τελευταίες διαπραγματεύσεις πριν από την τελική επικύρωση του πρωτοκόλλου του Kyoto. Οι Η.Π.Α. είχαν και πάλι τυπική παρουσία. Συνολικά 55 κράτη αναμενόταν να επικυρώσουν το πρωτόκολλο, μεταξύ αυτών και αναπτυσσόμενες χώρες που αντιστοιχούσαν στο 55% των εκπομπών CO_2 της κατηγορίας τους.
- **2002, COP 8, New Delhi, India**. Διατυπώθηκε έντονα το αίτημα των αναπτυσσόμενων χωρών για μεγαλύτερη οικονομική και τεχνολογική στήριξη.
- **2003, COP 9, Milan, Italy**. Εγκρίθηκε το αίτημα της προηγούμενης συνόδου με τη θέσπιση συγκεκριμένων μέτρων.
- **2004, COP 10, Buenos Aires**. Εξετάστηκε εκ νέου το ζήτημα της στήριξης των αναπτυσσόμενων κρατών, ενώ ξεκίνησαν και οι πρώτες συζητήσεις για την επέκταση της συνθήκης του Kyoto μετά τη λήξη της 1ης δεσμευτικής περιόδου το 2012.
- **2005, COP 11/MOP1, Montreal, Canada**. Οι συμμετέχοντες στην πολυπληθέστερη σύνοδο που πραγματοποιήθηκε συμφώνησαν στο «σχέδιο δράσης του Montreal» που αφορά την επέκταση του πρωτοκόλλου του Kyoto αλλά και περαιτέρω μείωση των εκπομπών.
- **2006, COP 12/ MOP 2, Nairobi, Kenya**. Εξετάστηκαν νέοι μηχανισμοί στήριξης για τις αναπτυσσόμενες περιφέρειες, όπως η Αφρική.
- **2007, COP 13/ MOP 3, Bali, Indonesia**. Στην ατζέντα ήταν ο έλεγχος προόδου, και το σχέδιο δράσης μετά το 2012.
- **2008, COP 14/ MOP 4, Poznan, Poland**. Προτάθηκε ένα σχέδιο οικονομικής βοήθειας προς τις φτωχότερες χώρες, καθώς και ένας μηχανισμός για την προστασία των δασικών εκτάσεων.
- **2009, COP 15/MOP 5, Copenhagen, Denmark**. Συμμετείχαν εκπρόσωποι από 192 κράτη, μεταξύ των οποίων η Κίνα και οι Η.Π.Α., καθώς και πολλές κοινωνικές και περιβαλλοντικές οργανώσεις. Ολοκληρώθηκε μεγάλο τμήμα των διπλωματικών διαπραγματεύσεων που απαιτούνται για μια νέα συμφωνία μετά το 2012. Υπήρξε δέσμευση για περισσότερα περιβαλλοντικά μέτρα από τις αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες θα λάβουν οικονομική βοήθεια US $ 30 δις για το διάστημα 2010-2012.
- **2010, COP 16/ MOP 6, Cancun, Mexico**. Δεν υπήρξε επικύρωση παρά μόνο μερική συμφωνία σε καίρια σημεία για την επόμενη περίοδο, μετά το 2012. Ειδικότερα ως έτος αναφοράς θεωρήθηκε και πάλι το 1990, ως αντικειμενικός στόχος ετέθη η μείωση των εκπομπών- σε σχέση με τη βάση αναφοράς- κατά 25-

40% μέχρι το 2020, και συμφωνήθηκε ότι τα επίσημα στοιχεία μέτρησης θα λαμβάνονται από την IPCC (http://www.ipcc.ch).

Είναι λοιπόν φανερό ότι από τη συνθήκη του Kyoto και έπειτα οι εξελίξεις στον τομέα των περιβαλλοντικών συμφωνιών ήταν πολλές και ραγδαίες. Μέχρι σήμερα έχουν διατυπωθεί αρκετές διαφορετικές απόψεις, οι οποίες αποτυπώνονται και στα μοντέλα που παρουσιάστηκαν.

3.3.2 Σχολιασμός των προτεινόμενων μοντέλων

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της προηγούμενης, οι ιθύνοντες καλούνταν να αποφασίσουν αν είναι προς όφελος της χώρας τους η προσχώρηση σε μια παγκόσμια περιβαλλοντική συμφωνία,. Έπρεπε να επιλέξουν ανάμεσα στη συμμετοχή και στη μοναχική πορεία, ενώ δειλά-δειλά είχαν ξεκινήσει να διαμορφώνονται και σκέψεις για τη δημιουργία κάποιων καινούριων συμμαχιών. Το περιβάλλον αυτό επιχειρούν να προσομοιώσουν οι Hackl και Pruckner (2002) μέσα από το paper τους που παρουσιάστηκε στην ενότητα §3.2.1.

Το σκηνικό άρχισε να διαφοροποιείται από τη σύνοδο της Χάγης και έπειτα. Η ένταξη νέων χωρών με αναπτυσσόμενες οικονομίες, αλλά και η άρνηση των Η.Π.Α. να επικυρώσουν το πρωτόκολλο του Kyoto δημιούργησαν νέα δεδομένα. Οι παίκτες έπαψαν να είναι συμμετρικοί, όπως στην πρώτη συμφωνία, και απαιτούνται αντισταθμιστικά οφέλη από τους ισχυρούς προς τους αδύναμους. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το πρόβλημα δεν πρόκειται να λυθεί την επόμενη δεκαετία, και θα απασχολήσει την ανθρωπότητα τουλάχιστον μέχρι τα τέλη του τρέχοντος αιώνα, είναι σίγουρο ότι θα χρειαστεί να υπάρξουν αρκετές δεσμευτικές περίοδοι αλλά και επαναδιαπραγματεύσεις της αρχικής συμφωνίας. Οι Weikard και Dellink (2010) εξετάζουν τις πιθανές λύσεις έχοντας το βλέμμα τους στραμμένο τόσο στο παρόν όσο και στο μέλλον. Η πρώτη δεσμευτική περίοδος άλλωστε ήδη οδεύει προς τη λήξη της.

Εκτός από την οικονομική βοήθεια, οι αναπτυγμένες χώρες έχουν την υποχρέωση να παρέχουν και τεχνολογική υποστήριξη προς τις αναπτυσσόμενες. Και φυσικά αντικείμενο μόνιμης διαπραγμάτευσης αποτελεί το μέγεθος αυτής της βοήθειας. Οι ανταλλαγές όμως μεταξύ των μελών της συμμαχίας, καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό και από τον περιορισμό των περιβαλλοντικών ζημιών, δηλαδή από τα ισοδύναμα οφέλη. Το μοντέλο World-Markal των Labriet και Loulou (2008) υπολογίζει βέλτιστους κανόνες διανομής, υπό διάφορα σενάρια ζημιών, και συνυπολογίζει όλες τις μορφές ανταλλαγών μεταξύ των παικτών.

Η μέχρι τώρα αποτυχία χάραξης μιας κοινής περιβαλλοντικής πολιτικής, κάνει πολλούς να αναρωτιούνται μήπως τελικά θα μπορούσαν να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα με τη δημιουργία πολλών μικρότερων συμμαχιών. Αυτήν ακριβώς την κατάσταση προσομοιώνουν οι Finus και Eyckmans (2004) μέσα από την εργασία τους που περιγράφηκε στην ενότητα §3.2.4.

Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός των σημαντικότερων, κατά τον υποφαινόμενο, σημείων και αποτελεσμάτων του κάθε μοντέλου, που θα ληφθούν υπόψη πριν την κατάθεση της τελικής πρότασης για την αντιμετώπιση του φαινομένου.

Α. Το μοντέλο των Hackl και Pruckner

Πρόκειται για ένα μοντέλο που παρουσιάζει εμπειρικά αποτελέσματα για τη μείωση των εκπομπών CO_2. Τα σημεία εκείνα που το καθιστούν ιδιαίτερο είναι τα εξής :

- Η εισαγωγή συναρτήσεων οριακού κόστους και οριακής ζημίας για κάθε ένα από τα 135 προσομοιωμένα κράτη. Οι πρώτες είναι λογαριθμικές και οι δεύτερες γραμμικές συναρτήσεις των εκπομπών (§3.2.1.2.3). Η επιλογή αυτή κρίνεται σωστή καθώς το κόστος αυξάνει δυσανάλογα όσο μεγαλώνουν και οι απαιτούμενες μειώσεις εκπομπών.
- Γίνεται διαχωρισμός μεταξύ εθνικής και διεθνούς συνιστώσας των κλιματικών αλλαγών, και έτσι αποδεικνύεται αν το πρόβλημα είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστεί σε συλλογική ή σε ατομική βάση.

Η περίοδος προσομοίωσης είναι 200 έτη, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τα μεταγενέστερα μοντέλα. Λαμβάνει μεγάλες ζημίες για τις αναπτυσσόμενες χώρες και μικρότερες για τις αναπτυγμένες, ενώ τα οφέλη από τη μείωση των εκπομπών κατανέμονται ομοιόμορφα μεταξύ των διάφορων κρατών (§3.2.1.2.2). Διαφέρει από τα άλλα μοντέλα που εξετάστηκαν, όπου οι αναπτυγμένες χώρες (Η.Π.Α., Ε.Ε.) κατέχουν τη μερίδα του λέοντος όσον αφορά τα περιβαλλοντικά κέρδη, ενώ οι αναπτυσσόμενες χώρες λαμβάνουν, μέσω των ανταλλαγών, αντισταθμιστικά οφέλη.

Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου προσομοίωσης είναι η στατικότητα που παρουσιάζει, καθώς λαμβάνει ως μεταβλητή απόφασης το αρχικό επίπεδο εκπομπών του έτους 1991, και θεωρεί σταθερό το ρυθμό μείωσης των εκπομπών. Το γεγονός αυτό δεν επιτρέπει στο μοντέλο να ενσωματώσει αλλαγές που μπορεί να προκύψουν σε ένα συνολικό διάστημα 200 ετών!

Μία ακόμη αδυναμία του είναι η μία περίοδος δέσμευσης, που του στερεί τη δυνατότητα να εισάγει το στοιχείο των επαναδιαπραγματεύσεων. Ωστόσο δεν πρέπει να ξεχνά κανείς ότι αποτυπώνει και την επικρατούσα τάση στις αρχές της δεκαετίας, όπου η δημιουργία μιας μακροχρόνιας υπερ-συμμαχίας έμοιαζε ως η μόνη λύση. Επιπλέον θα είχε ενδιαφέρον αν υπολογίζονταν αναλυτικότερα και οι ανταλλαγές μεταξύ των μελών των ,έστω και μη σταθερών, συμμαχιών που προέκυψαν.

Τα αποτελέσματά του δείχνουν ότι στο βέλτιστο κατά Paretto σενάριο απαιτείται μείωση των παγκόσμιων εκπομπών κατά 28%. Για άλλη μία φορά το μεγαλύτερο βάρος πέφτει στις χώρες με μικρό οριακό κόστος όπως η Κίνα και η Ινδία, σημαντικές όμως μειώσεις πρέπει να κάνουν και οι Η.Π.Α.

Επίσης από το παραπάνω ποσοστό, μόλις το 7% αποτελεί συνεισφορά προς το κοινό καλό, ενώ το υπόλοιπο 21% περιγράφει την προθυμία των χωρών να ισοσκελίσουν τις οριακές τους ζημίες και τα οριακά τους κόστη. Με απλά λόγια προτρέπει τις χώρες να προβούν σε μειώσεις των εκπομπών τους ανεξάρτητα από το αν θα καταστεί εφικτή μια παγκόσμια περιβαλλοντική συμφωνία.

Παράλληλα εξετάστηκε η πιθανότητα δημιουργίας συμμαχιών μεταξύ των 7 προσομοιωμένων περιφερειών. Από το σύνολο των 121 δυνατών σχηματισμών, μία μόλις συμμαχία αποδείχθηκε εσωτερικά και εξωτερικά σταθερή χωρίς την οικονομική αλληλεπίδραση των μελών της. Είναι αυτή ανάμεσα στην Ε.Ε. και τις OECD χώρες, η οποία χαρακτηρίζεται από μικρές μειώσεις των εκπομπών που εξυπηρετούν και τα δύο μέλη. Διαμορφώθηκαν επίσης και οι εσωτερικά σταθερές συμμαχίες των Η.Π.Α.-ROW, Ε.Ε.–ROW, και, Η.Π.Α.-Ε.Ε. που αποτελούν συνήθη ζευγάρια, όπως φάνηκε και στα υπόλοιπα μοντέλα που εξετάστηκαν.

Εισάγοντας την παράμετρο των οικονομικών ανταλλαγών τα αποτελέσματα δε διαφοροποιούνται ιδιαίτερα. Οι μόνες εσωτερικά και εξωτερικά σταθερές συμμαχίες που προκύπτουν είναι αυτές της «Ινδίας και της Κίνας» με τις «λιγότερο αναπτυγμένες χώρες» και την ROW, όπου οι χρηματοροές κινούνται από τις δύο τελευταίες οικονομικά αδύναμες περιφέρειες προς την πρώτη λόγω των μεγάλων μειώσεων εκπομπών που αυτή πετυχαίνει.

Το παραπάνω σενάριο είναι προφανώς ανεφάρμοστο, και έτσι η επικρατούσα άποψη είναι ότι η δημιουργία συμμαχιών δε μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στην επίλυση του προβλήματος. Διαφαίνεται μια ελπίδα να αλλάξει η κατάσταση αν στο τραπέζι των διαπραγματεύσεων συμπεριληφθούν και άλλα φλέγοντα ζητήματα, όπως το διεθνή

οικονομικά χρέη αλλά και η ανάπτυξη των οικονομικά ασθενέστερων χωρών του πλανήτη. Μέχρι τότε η περιβαλλοντική πολιτική των κρατών είναι προτιμότερο να καθορίζεται με κριτήρια ατομικής βελτιστοποίησης.

Β. Το μοντέλο των Weikard και Dellink

Είναι ένα σύγχρονο μοντέλο που καταλήγει σε διαφορετικά συμπεράσματα από την πλειονότητα της βιβλιογραφίας. Οι ιδιαιτερότητες που εισάγει είναι οι εξής:

- Εξετάζει μη συμμετρικούς παίκτες.
- Χρησιμοποιείται το στοιχείο των ανταλλαγών μεταξύ των μελών της συμμαχίας.
- Επιτρέπονται οι επαναδιαπραγματεύσεις.

Συνολικά προσομοιώνονται 12 περιφέρειες, ενώ η περίοδος προσομοίωσης είναι 100 έτη, καθώς λαμβάνεται υπόψη τόσο ο περιορισμός της χρήσης ανθρακικών παραγωγών από τις νέες τεχνολογίες, όσο και η σταδιακή εξάντληση των αποθεμάτων του συγκεκριμένου υλικού. Οι συναρτήσεις οριακού κόστους και οριακής ζημίας των περιφερειών είναι γραμμικές και τετραγωνικές συναρτήσεις αντίστοιχα των μειώσεων των εκπομπών, και προσδιορίζονται από το μοντέλο STACO (Finus et.al. (2006)).

Τα αποτελέσματα στα οποία καταλήγει είναι εξαιρετικά ενδιαφέροντα. Για μία δεσμευτική περίοδο είναι δυνατό να σχηματιστούν 108 σταθερές συμμαχίες επί συνόλου 4084, ενώ η πιο πολυμελής εξ αυτών αποτελείται από έξι περιφέρειες. Η αποδοτικότερη σταθερή συμμαχία περιλαμβάνει 5 μέλη και πετυχαίνει το 46% των κερδών της υπερ-συμμαχίας. Για μία ακόμη φορά οι χώρες με μικρά οριακά κόστη είναι μέλη των περισσότερων αποδοτικών συμμαχιών, και εισπράττουν υψηλά ανταποδοτικά οφέλη. Μεγάλα όμως οφέλη αποκομίζουν και οι αναπτυγμένες περιφέρειες, όπως οι Η.Π.Α., η Ε.Ε. και η Ιαπωνία, ακόμη και όταν δεν συμμαχούν.

Τα κέρδη ωστόσο αυξάνονται θεαματικά με τη διεξαγωγή επαναδιαπραγματεύσεων. Για δύο δεσμευτικές περιόδους διάρκειας 50 ετών η καθεμία, η βέλτιστη ακολουθία συμμαχιών επιτυγχάνει το 59% των κερδών της υπερ-συμμαχίας για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης. Η πιθανή τιμωρία στη $2^{η}$ περίοδο αναγκάζει και τις τρεις ισχυρές περιφέρειες που αναφέρθηκαν προηγουμένως να συνεργαστούν. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι στις τρεις βέλτιστες ακολουθίες μία εξ' αυτών συμμετέχει στην $1^{η}$ περίοδο και μια διαφορετική στη $2^{η}$ περίοδο.

Οι παίκτες που συνεργάζονται και στα δύο στάδια μοιράζονται την πλειονότητα των κερδών της συμμαχίας, προσφέροντας στα περιστασιακά μέλη μόνο το εξωγενές εναλλακτικό τους κέρδος. Στην Κίνα και στην Ινδία επιμερίζεται το μεγαλύτερο βάρος του περιορισμού των εκπομπών, όμως και πάλι οι Η.Π.Α., η Ε.Ε. και η Ιαπωνία εισπράττουν τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά οφέλη.

Αποδεικνύεται ότι κρίσιμο παράγοντα αποτελεί η χρονική στιγμή των επαναδιαπραγματεύσεων. Αν η $1^{η}$ δεσμευτική περίοδος διαρκεί λίγο σχηματίζονται μεγαλύτερες συμμαχίες υπό το φόβο της τιμωρίας, όμως η περιορισμένη διάρκεια τους ψαλιδίζει τα κέρδη. Αν η $2^{η}$ περίοδος είναι σύντομη μειώνεται το στοιχείο της απειλής, και αντίστοιχα και ο αριθμός των μελών της $1^{ης}$ συμμαχίας, η οποία όμως διαρκεί περισσότερο. Είναι φανερό ότι πρέπει να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών απαιτήσεων.

Πράγματι τα καλύτερα αποτελέσματα παρατηρούνται για διάρκεια της $1^{ης}$ περιόδου από 20 έως 50 έτη. Η υπερ-συμμαχία σχηματίζεται όταν οι επαναδιαπραγματεύσεις γίνονται έπειτα από 20 έτη, όμως ο συντελεστής απόδοσης της ακολουθίας συμμαχιών είναι 59%. Η βέλτιστη από πλευράς κερδών ακολουθία σχηματίζεται όταν η $1^{η}$ περίοδος διαρκεί 30 έτη και το ποσοστό των κερδών της αγγίζει το 62%.

Τα παραπάνω αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με μεγάλο κομμάτι της βιβλιογραφίας, που καταλήγει ότι οι μόνες σταθερές συμμαχίες είναι ολιγομελείς και απαρτίζονται από δύο ή τρεις παίκτες (Barret (1994), Finus (2006)). Οι κύριοι λόγοι που διαφοροποιούν το συγκεκριμένο μοντέλο αναφέρονται παρακάτω.

Ένας καλοσχεδιασμένος κανόνας ανταλλαγών αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για τη σταθεροποίηση μεγάλων συμμαχιών, ιδιαίτερα όταν τα οριακά κόστη και οι οριακές ζημίες των μελών παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση. Μάλιστα με τον κανόνα διανομής που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το μοντέλο παρέχονται πρόσθετα κίνητρα συνεργασίας, και εξασφαλίζεται η εσωτερική σταθερότητα των περισσότερων συμμαχιών. Τέλος οι επαναδιαπραγματεύσεις μπορούν να ενισχύσουν το στοιχείο της απειλής και να εξωθήσουν τους παίκτες σε συνεργασία στην $1^{η}$ περίοδο.

Αν θα έπρεπε κάποιος να εντοπίσει αδυναμίες του μοντέλου, θα στεκόταν στο γεγονός ότι δεν εξετάζονται πολλαπλές ισορροπίες σε κανένα από τα δύο στάδια του παιγνίου, καθώς επίσης και ότι οι μόνες ανταλλαγές είναι οικονομικές ή αφορούν ανταλλαγές δικαιωμάτων εκπομπών. Για αυτό το λόγο όμως παρατέθηκαν και τα μοντέλα των δύο τελευταίων ενοτήτων, που αλληλοσυμπληρώνουν τα προηγούμενα.

Γ. Το μοντέλο των Labriet και Loulou

Το World-Markal είναι το τεχνολογικά πληρέστερο και πιο ολοκληρωμένο από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν. Μοντελοποιεί στρατηγικές συνεργασίας και διαφοροποίησης για 15 διαφορετικές περιφέρειες, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις περιβαλλοντικές τους ζημίες όσο και τα κόστη μείωσης των εκπομπών τους, τα οποία τα υπολογίζονται από το μοντέλο των Nordhaus και Boyer (1999) όπως αναφέρθηκε και στην §3.2.3.2. Η περίοδος προσομοίωσης είναι 55 έτη, ωστόσο οι περιβαλλοντικές ζημίες υπολογίζονται για συνολικά 100 έτη. Με τον τρόπο αυτό οι δύο μελετητές τονίζουν τις μακροχρόνιες συνέπειες των GHG, και για αυτό έχουν λάβει το ρυθμό μείωσης των περιβαλλοντικών ζημιών r ίσο με 2%, δηλαδή ακριβώς το μισό σε σύγκριση με τους Hackl και Pruckner (2002).

Σκοπός είναι να προσδιοριστούν τα μέτρα εκείνα που μπορούν να γεφυρώσουν το χάσμα ανάμεσα στη συνεργασία και τη διαφοροποίηση. Για να μπορέσουν να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα η προσομοίωση έχει γίνει για τρία διαφορετικά σενάρια ζημιών (§3.2.3.3.4). Τελικά προτείνονται τέσσερις κανόνες διανομής βασισμένοι στη θεωρία παιγνίων (§3.2.3.5) που διαμοιράζουν τα κέρδη με διαφορετικό τρόπο, και μπορούν να εγγυηθούν τη σταθερότητα της υπερ-συμμαχίας καθώς όλοι οι παίκτες αποκομίζουν μεγαλύτερα οφέλη σε σχέση με αυτά που θα είχαν αν ακολουθούσαν ατομική πορεία.

Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη διεύρυνση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κρατών, ώστε εκτός από οικονομικές συναλλαγές να μπορούν ως αντισταθμιστικά οφέλη να προσφέρονται η ανταλλαγή τεχνογνωσίας, η κοινή υλοποίηση έργων υποδομής, οι εμπορικές συμφωνίες αυξάνουν την ευελιξία στις διαπραγματεύσεις.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όσο πιο ασύμμετροι είναι μεταξύ τους οι παίκτες, δηλαδή όσο πιο ανομοιογενώς κατανέμονται οι περιβαλλοντικές ζημίες, τόσο μεγαλύτερα είναι τα κίνητρα διαφοροποίησης, αλλά και αντίστοιχα περισσότεροι είναι οι τρόποι διανομής των κερδών της συμμαχίας μεταξύ των μελών της. Επιπλέον εξετάστηκε η πιθανότητα δημιουργίας ενδιάμεσων συμμαχιών χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση και διαπιστώθηκε ότι αυτό είναι εφικτό για περιφέρειες με παρόμοια συμφέροντα, όμως οι μειώσεις εκπομπών που πραγματοποιούνται είναι πολύ μικρές.

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι πολλά και περιγράφηκαν αναλυτικά στην §3.2.3, ωστόσο υπάρχουν και κάποια ξεκάθαρα μειονεκτήματά του. Το βασικότερο είναι ότι πρόκειται για μία μέθοδο ανοικτού βρόχου, όπου οι διαπραγματεύσεις διεξάγονται μία χρονική στιγμή και οι αποφάσεις που λαμβάνονται ισχύουν για ολόκληρη την περίοδο. Έτσι

οι ανταλλαγές και τα κέρδη δεν αναπροσαρμόζονται, ενώ αφαιρείται η δυνατότητα επαναδιαπραγμάτευσης που με το στοιχείο της απειλής μπορεί να δημιουργήσει συσπείρωση, όπως συμβαίνει σε δυναμικά παίγνια. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι και σε αυτό το μοντέλο δεν εξετάστηκε η πιθανότητα δημιουργίας πολλαπλών συμμαχιών έστω και για τη μία δεσμευτική περίοδο προσομοίωσής του.

Δ. Το μοντέλο των Finus και Weikard

Η δημιουργία περιβαλλοντικών συμμαχιών μοντελοποιείται ως ένα παίγνιο δύο φάσεων. Στην πρώτη φάση οι παίκτες αποφασίζουν αν θα ενταχθούν σε κάποια από τις συμμαχίες και στη συνέχεια τα μέλη των συμμαχιών καθορίζουν τα επίπεδα μείωσης των εκπομπών τους.

Διαφοροποιείται από την πλειονότητα της βιβλιογραφίας καθώς είναι από τις λίγες προσεγγίσεις που εξετάζουν την πιθανότητα δημιουργίας πολλαπλών συμμαχιών, αντί μίας και μοναδικής. Και μάλιστα αποδεικνύεται προφητική, καθώς αρκετά χρόνια πριν είχε εκτιμήσει τις δυσκολίες του εγχειρήματος της υπερ-συμμαχίας, και είχε αναζητήσει εναλλακτικές. Η δεύτερη ιδιαιτερότητα που εισάγει είναι η καθιέρωση δύο κανόνων αποκλειστικής συμμετοχής για την ένταξη στη συμμαχία, αντί του κανόνα ανοικτής συμμετοχής που υιοθετείται από τα περισσότερα μοντέλα (§3.2.4.1).

Η περίοδος προσομοίωσης είναι 350 έτη, και οι συναρτήσεις κόστους και ζημιών για τις έξι διαφορετικές περιφέρειες λαμβάνονται από το μοντέλο CLIMNEG. Προσδιορίζονται σταθερές δομές συμμαχιών και αξιολογούνται με βάση τα κέρδη τους, αλλά και τις περιβαλλοντικές τους επιδόσεις. Τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι σημαντικά και ίσως πρέπει να αποτελέσουν οδηγό για το μέλλον.

Διαπιστώνεται ότι ούτε η υπερ-συμμαχία, ούτε και οι συμμαχίες του Kyoto, με ή χωρίς τις Η.Π.Α., είναι σταθερές ανεξάρτητα από τον κανόνα συμμετοχής. Σταθερές αποδεικνύονται μόνο οι ολιγομελείς συμμαχίες, οι οποίες εξομαλύνουν σε σημαντικό βαθμό το χάσμα μεταξύ καθολικής συνεργασίας και διαφοροποίησης. Επίσης ο κανόνας αποκλειστικής συμμετοχής, και ειδικότερα με ομόφωνη εκλογή, εξασφαλίζει μεγαλύτερη σταθερότητα αλλά και αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με τον κανόνα ανοικτής συμμετοχής.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι σταθερές δομές πολλαπλών συμμαχιών είναι πιο αποδοτικές σε σχέση με αυτές μίας μόνο συμμαχίας. Αυτό θέτει σε ευθεία αμφισβήτηση την

περιβαλλοντική πολιτική που ακολουθείται μέχρι σήμερα η οποία επιτάσσει την ένταξη όσο το δυνατόν περισσότερων κρατών στο πρωτόκολλο του Kyoto.

Τέλος γίνεται φανερό ότι παίκτες με όμοια συμφέροντα, δηλαδή με παρεμφερείς συναρτήσεις οριακού κόστους και οριακών ζημιών, είναι δυνατό να δημιουργήσουν συμμαχίες ακόμη και χωρίς οικονομική αλληλεπίδραση (§3.2.4.2.1). Εξαιρούνται οι χώρες που παρουσιάζουν είτε πολύ υψηλές είτε πολύ χαμηλές τιμές οριακού κόστους και οριακών ζημιών, καθώς δε βρίσκουν εύκολα συμμάχους. Με την εισαγωγή των ανταλλαγών τα αντικρουόμενα συμφέροντα αμβλύνονται, και αυτό επιβεβαιώνεται και στην πράξη από το γεγονός ότι από την COP 10 και έπειτα η στήριξη των ασθενέστερων κρατών είναι μόνιμα στην ατζέντα των συνόδων.

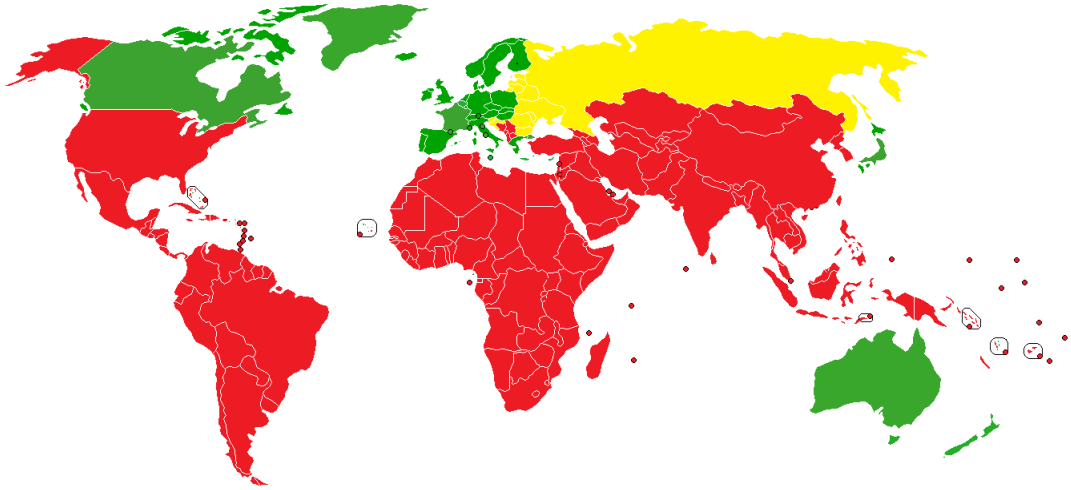
Φυσικά η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει και αδυναμίες, οι οποίες μπορούν να φανούν εύκολα αν γίνει αντιπαραβολή με τις προηγούμενες που περιγράφηκαν. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται μόνο ένας κανόνας ανταλλαγής μεταξύ των μελών, ενώ και τα αντισταθμιστικά οφέλη περιορίζονται στις οικονομικές επιδοτήσεις, πράγμα που μειώνει την ευελιξία στις διαπραγματεύσεις αλλά και τη σταθερότητα των συμμαχιών. Ακόμη παρότι εξετάζονται πολλαπλές συμμαχίες, η δεσμευτική περίοδος είναι μόλις μία, και δεν υπάρχει το στοιχείο των επαναδιαπραγματεύσεων που θα επέτρεπε στο μοντέλο να έχει δυναμική συμπεριφορά.

Τέλος θα ήταν σκόπιμη η διεύρυνσή του, ώστε να συμπεριλάβει περισσότερες από έξι περιφέρειες και να αποτυπώσει καλύτερα τις υπάρχουσες τάσεις. Για παράδειγμα η προσομοίωση της ROW, μιας μεγάλης περιφέρειας που προφανώς περιλαμβάνει και κράτη με διαφορετικά συμφέροντα, απαιτεί αρκετές απλουστεύσεις και δεν προσφέρεται για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

3.3.3 Συμπεράσματα

Τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες αποτύπωναν τις διαφορετικές απόψεις που επικρατούν σήμερα σχετικά με την επίλυση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Κάποια συμφωνούν με το υπάρχον πλαίσιο περιβαλλοντικής πολιτικής και καταθέτουν προτάσεις για τη βελτίωσή του, διατηρώντας όμως ως στόχο τη δημιουργία μιας παγκόσμιας περιβαλλοντικής συμφωνίας. Άλλα πάλι θεωρούν το πρωτόκολλο του Kyoto ως αδιέξοδο, και επενδύουν στη δημιουργία πολλαπλών περιβαλλοντικών συμφωνιών. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα όλων των προσεγγίσεων αναπτύχθηκαν ξεκάθαρα στις προηγούμενες ενότητες.

Επειδή ωστόσο κάθε πρόταση κρίνεται από τα αποτελέσματά της, εκτός από τα συμπεράσματα των συνόδων (§3.3.1), παρατίθεται και ο χάρτης του σχήματος 3.2 όπου απεικονίζονται τα κράτη που δεσμεύονται με το πρωτόκολλο του Kyoto. Με πράσινο χρώμα φαίνονται τα κράτη που υπακούουν πλήρως στη συμφωνία (ANNEX 2), με κίτρινο χρώμα εκείνα που δεσμεύονται μερικώς και έχουν κάποια ελευθερία στον περιορισμό των εκπομπών τους. Κατατάσσονται στο ANNEX 1, και είναι γνωστά ως κράτη με οικονομίες σε μετάβαση. Με κόκκινο χρώμα είναι οι χώρες που δε δεσμεύονται με το πρωτόκολλο του Kyoto. Είναι είτε χώρες που δεν εντάσσονται στο ANNEX 1 και έτσι δεν έχουν υποχρέωση περιορισμού των εκπομπών τους, είτε χώρες που δεν έχουν υπογράψει ακόμη το πρωτόκολλο.



Σχήμα 3.2 Παγκόσμιος χάρτης με τα κράτη που δεσμεύονται από το Πρωτόκολλο του Kyoto κατά το έτος 2010. (Πηγή : Wikipedia.org)

Μία σύντομη ανάγνωση του χάρτη είναι ικανή για να καταδείξει την αποτυχία του εγχειρήματος. Παρότι ο στόχος που είχε τεθεί από τα ANNEX-1 μέλη για μείωση των συνολικών εκπομπών τους μέχρι το 2012 κατά 5,2% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 φαίνεται να επιτυγχάνεται, αυτό μάλλον αποτελεί επίτευγμα μιας ομάδας κρατών με όμοια συμφέροντα και όχι το αποτέλεσμα μιας παγκόσμιας συλλογικής προσπάθειας.

Η στρατηγική λοιπόν που πρέπει να ακολουθηθεί υπαγορεύεται από μία επισκόπηση της σημερινής πραγματικότητας. Η ιδέα μιας παγκόσμιας υπερ-συμμαχίας μοιάζει ανέφικτη, έπειτα από σχεδόν 15 χρόνια διαπραγματεύσεων. Οι ιθύνοντες θα πρέπει να αρχίσουν να εξετάζουν πιο εντατικά το σενάριο δημιουργίας πολλαπλών συμμαχιών. Η επιστημονική κοινότητα άλλωστε έχει ήδη ξεκινήσει να το πράττει.

Αναγκαία μοιάζει και η επέκταση των μορφών παροχής αντισταθμιστικών οφελών ανάμεσα στα συνεργαζόμενα κράτη. Η παροχή μόνο οικονομικής ενίσχυσης προς τα ασθενέστερα μέλη της εκάστοτε συμμαχίας δε μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στην επίλυση του προβλήματος. Η ανταλλαγή τεχνογνωσίας, και η συνεργασία σε ενεργειακά ζητήματα, όπως αυτή περιγράφεται στο μοντέλο Markal (§3.2.3) έχει να προσφέρει πολύ περισσότερα. Κάθε νέα συμμαχία πρέπει να βασίζεται σε ένα τεχνολογικά πλούσιο φάσμα ανταλλαγών. Επίσης αντικείμενο συζήτησης είναι σκόπιμο να αποτελέσουν και προβλήματα όπως τα διεθνή χρέη των οικονομικά αδύναμων κρατών, κάτι που ήδη συμβαίνει από την COP 14 και έπειτα, και είχαν πολύ εύστοχα επισημάνει οι Hackl και Pruckner (2002) (§3.2.1), πριν μία δεκαετία.

Παράλληλα όλες οι περιβαλλοντικές συμφωνίες είναι απαραίτητο να είναι ευέλικτες και να αναπροσαρμόζουν σε τακτά χρονικά διαστήματα τους όρους τους, ενσωματώνοντας τις περιβαλλοντικές, οικονομικές και λοιπές αλλαγές του παγκόσμιου χάρτη. Το στοιχείο των επαναδιαπραγματεύσεων είναι χρήσιμο για τη σύναψη αποδοτικών συμφωνιών, ωστόσο η περίοδος επανάληψης τους είναι ένα στοιχείο μοναδικό και χαρακτηριστικό για κάθε συμμαχία και πρέπει να προσδιορίζεται ξεχωριστά.

Ολοκληρώνοντας θα ήταν σκόπιμο να τονιστεί ότι για ένα πολύπλευρο πρόβλημα, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου δεν είναι εύκολο να υπάρξει μία και μοναδική λύση που θα καλύπτει όλες τις συνιστώσες του και θα ικανοποιεί όλους τους συμμετέχοντες. Στόχος είναι η εύρεση μίας ή περισσότερων ισορροπιών Nash, ανάλογα με τον αριθμό των παιγνίων που θα προκύψουν τελικά, οι οποίες θα εξασφαλίσουν τις βέλτιστες μειώσεις εκπομπών και θα συμβάλλουν έτσι στην εξάλειψη των συνεπειών αυτού του τεράστιου οικολογικού προβλήματος του 21^{ου} αιώνα.

3.4 Η άλλη άποψη : "Το φαινόμενο του Θερμοκηπίου. Μύθος ή πραγματικότητα ;"

Στη σημερινή πραγματικότητα δεν υπάρχει πιθανότατα κανένα άλλο περιβαλλοντικό ζήτημα τόσο πολυσυζητημένο και παρεξηγημένο όσο το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η κυρίαρχη άποψη είναι ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα ρυπογόνο στοιχείο που ευθύνεται για τη δραματική υπερθέρμανση του πλανήτη και τη δημιουργία ακραίων καιρικών φαινομένων όπως η ανύψωση της στάθμης των θαλασσών, οι πλημμύρες και οι τυφώνες που σαρώνουν συχνά κατοικημένες εκτάσεις, το λιώσιμο των παγετώνων, οι ξηρασίες, κ.α. Κύριο μέλημα της παγκόσμιας κοινότητας είναι η εύρεση κατάλληλων μεθόδων και στρατηγικών για τον περιορισμό των εκπομπών των επιβλαβών αερίων του θερμοκηπίου, και η παρουσίαση αυτών αποτέλεσε το μεγαλύτερο κομμάτι της εργασίας.

Για τη σφαιρικότερη όμως αντιμετώπιση του προβλήματος κρίνεται απαραίτητη και η παράθεση της αντίθετης γνώμης. Το τελευταίο διάστημα διαμορφώνεται μία ολοένα και αυξανόμενη τάση, η οποία αμφισβητεί τόσο την ύπαρξη αυτού καθ' αυτού του φαινομένου, όσο και τη συνεισφορά της ανθρώπινης δραστηριότητας στη δημιουργία του. Διατυπώνονται ενστάσεις τόσο για την ορθότητα των καταγραμμένων δεδομένων, όσο και για τον τρόπο παρουσίασης και ερμηνείας τους από τους αρμόδιους περιβαλλοντικούς φορείς.

Συγκεκριμένα η εξέλιξη του φαινομένου αποτυπώνεται στις περιβαλλοντικές εκθέσεις που συντάσσονται κατά προσέγγιση σε εξαετή βάση από το διεθνή περιβαλλοντικό οργανισμό IPCC (United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change). Αυτές περιλαμβάνουν συνολικά περίπου 900 σελίδες, και οι καταγραφές τους κρίνονται επιστημονικά αξιόπιστες. Το σημείο αντιπαράθεσης είναι ότι στους ιθύνοντες παραδίδεται μία σύντομη περίληψη της κάθε έκθεσης (SPM/Summaries for Policymakers) και η οποία, σύμφωνα με τους διαφωνούντες, διαστρεβλώνει τα πραγματικά πορίσματα και οδηγεί στη χάραξη λανθασμένων περιβαλλοντικών στρατηγικών.

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα παρατίθεται απόσπασμα της SPM του 2001 όπου αναφέρεται το εξής: "***Υπάρχουν νέα και ισχυρά αποδεικτικά στοιχεία ότι η υπερθέρμανση που παρατηρείται την τελευταία 50ετία οφείλεται κυρίως στην ανθρώπινη δραστηριότητα***". Το αντίστοιχο απόσπασμα όμως της πρωτογενούς έκθεσης αναφέρει τα εξής : "***Το γεγονός ότι η μέση παγκόσμια θερμοκρασία άρχισε να αυξάνει από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και ότι στο ίδιο διάστημα άρχισαν να διαμορφώνονται νέες τάσεις, δεν αποτελεί πειστήριο για ανθρωπογενή επίδραση στο κλιματικό περιβάλλον. Το κλίμα ανέκαθεν παρουσίαζε μεταβολές χρονολογικά, και συνεπώς η παρατηρούμενη αλλαγή ενδέχεται να είναι φυσιολογική***."

Στη συνέχεια γίνεται παράθεση των θεμελιωδών σημείων αμφισβήτησης της κυρίαρχης προσέγγισης σχετικά με το φαινόμενο του θερμοκηπίου από τη νέα αυτή τάση, καθώς και η επιχειρηματολογία στην οποία στηρίζεται αυτή η μερίδα της επιστημονικής κοινότητας (www.friendsofscience.org).

- ***Η συγκέντρωση του CO_2 στην ατμόσφαιρα αυξάνει με επικίνδυνο ρυθμό.***

Κάθε χρόνο η ανθρώπινη δραστηριότητα, κυρίως η καύση του άνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, προκαλεί την εκπομπή περίπου 6.5 gigatons CO_2 στην ατμόσφαιρα. Παρά το μεγάλο αυτό ποσό των εκπομπών, η ετήσια αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα ποικίλλει σημαντικά, όντας μηδενική για κάποια έτη (1992) ή ακόμη και αρνητική για κάποια άλλα (1997, 1998).

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το CO_2 αποτελεί τροφή για τα επίγεια φυτά. Όσο περισσότερο εκπέμπεται, τόσο περισσότερο απορροφάται από αυτά. Επιστημονικές έρευνες δείχνουν ότι η ετήσια ποσότητα CO_2 που μπορεί να απορροφηθεί από τη χλωρίδα πλησιάζει τους 10 gigatons, δηλαδή είναι σχεδόν τριπλάσια από την καθαρή ετήσια αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι οι προβλεπόμενες αυξήσεις στην ατμοσφαιρική συγκέντρωση του CO_2 θα συμβούν, εκτός αν διαφοροποιηθεί σημαντικά ο συνολικός αριθμός των φυτών του πλανήτη.

- ***Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία αυξάνει με ταχύτατο και ανεξέλεγκτο ρυθμό.***

Η IPCC υπολογίζει τις μέσες ετήσιες θερμοκρασίες της γης λαμβάνοντας δεδομένα από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται κοντά σε αστικές περιοχές. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν μία θέρμανση της τάξης των $0.6^{o}C$ σε σχέση με τον προηγούμενο αιώνα. Η τροποποίηση της γης λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας είχε σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση του κλίματος στην επιφάνεια του εδάφους.

Χαρακτηριστική περίπτωση είναι η επίδραση των «αστικών θερμικών νησίδων» (“urban heat islands”), όπου η άσφαλτος και το τσιμέντο, προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι και 12 ^{o}C σε σχέση με γειτονικές αγροτικές περιοχές. Η IPCC ισχυρίζεται ότι χρησιμοποιεί μία «από-αστικοποιημένη» μέθοδο καταγραφής, ωστόσο διάφορες έρευνες έχουν δείξει ότι ακόμη και μικρές πληθυσμιακές μεταβολές είναι ικανές να προκαλέσουν μία στατιστικά υπολογίσιμη τοπική υπερθέρμανση. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι

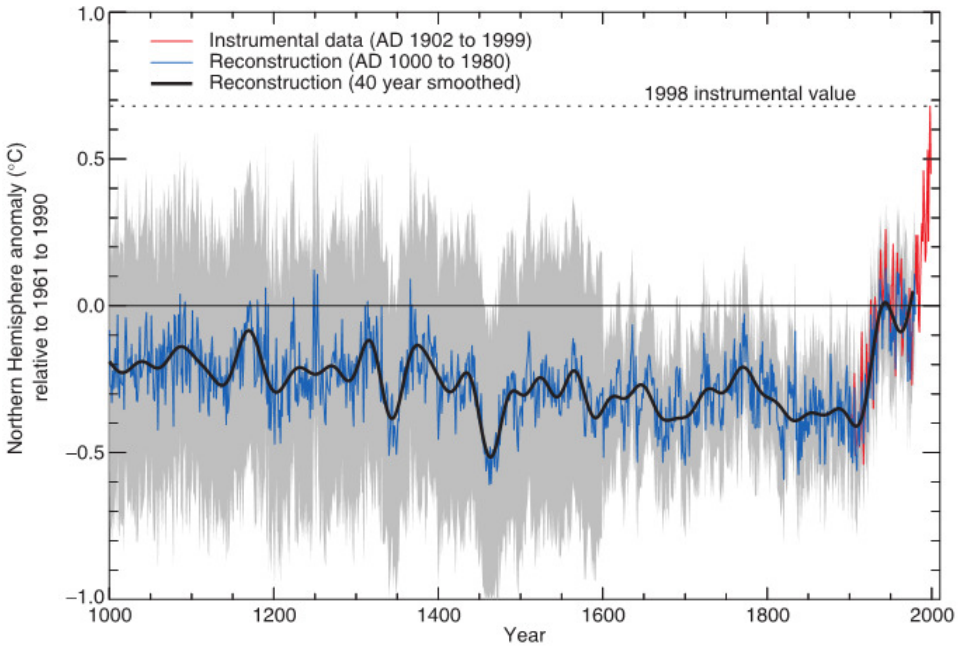
όπου καταγράφηκε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, αυτό οφειλόταν κυρίως σε αύξηση της ελάχιστης παρά της μέγιστης θερμοκρασίας.

Τίθεται λοιπόν ξεκάθαρα θέμα αμφισβήτησης των μετρήσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών. Αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι πολλοί μετεωρολογικοί σταθμοί ήταν εγκατεστημένοι σε αεροδρόμια που αρχικά βρίσκονταν σε αγροτικές εκτάσεις, ενώ πλέον με την αυξανόμενη δόμηση έχουν ενσωματωθεί στις πόλεις. Επιπλέον η αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων και η σύγκριση με τα προηγούμενα έτη πλήττεται και από τον τερματισμό της λειτουργίας περίπου των 2/3 των υφιστάμενων σταθμών από το 1975 και έπειτα.

Η IPCC αγνοεί επιδεικτικά τις νέες και πιο ακριβείς μεθόδους μέτρησης της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας που έχουν ανακαλυφθεί. Από το 1979 και έπειτα πραγματοποιούνται μετρήσεις της θερμοκρασίας των κατώτερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων από δορυφόρους με χρήση της μικροκυματικής ραδιομετρίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος μέτρησης παρουσιάζει ακρίβεια της τάξης των 0.1 ^{o}C, που είναι σαφώς καλύτερη σε σχέση με τους επίγειους σταθμούς μέτρησης. Μάλιστα σύμφωνα με τα κλιματολογικά μοντέλα τα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα είναι εκείνα που επηρεάζονται περισσότερο από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το εντυπωσιακό είναι ότι οι μετρήσεις αυτές δεν έχουν δείξει καμία αξιόλογη θερμοκρασιακή μεταβολή.

- ***Οι παγκόσμιες κλιματικές τάσεις κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα διαφέρουν σημαντικά από αυτές που υπήρχαν την προηγούμενη χιλιετία.***

Το 2001 στην τρίτη έκθεση που παρουσίασε η IPCC συμπεριέλαβε και το γράφημα 3.14 που παρουσιάζει τις θερμοκρασιακές μεταβολές του βόρειου ημισφαίριου του πλανήτη κατά την τελευταία χιλιετία. Τα σημεία που είναι χρωματισμένα με τη μπλε γραμμή είναι αποτελέσματα προσομοίωσης, ενώ με τα σημεία με την κόκκινη γραμμή είναι δεδομένα μετρήσεων. Φαίνεται λοιπόν ότι ενώ ο πλανήτης παρουσίαζε μια σχετική κλιματική σταθερότητα την τελευταία χιλιετία, από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα και έπειτα παρατηρείται μία απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Μάλιστα εξαιτίας της απότομης κλίσης του σχήματος, ο κλιματολόγος Jerry Mahlman του προσέδωσε την ονομασία “hockey stick graph”, λόγω της ομοιότητας που παρουσιάζει με το γνωστό μπαστούνι του hockey.



Γράφημα 3.14 Το γράφημα "hockey stick" (Πηγή: IPCC)

Οι διαφωνούντες ισχυρίζονται ότι σημαντικές κλιματικές μεταβολές έχουν παρουσιαστεί πολλάκις κατά τη γεωλογική περίοδο. Για παράδειγμα η θερμή Μεσαιωνική περίοδος, κατά την οποία οι Vikings μετοίκησαν στη Γροιλανδία, έχει καταγραφεί ιστορικά ως μία από τις πιο θερμές περιόδους, με επίπεδα θερμοκρασιών αντίστοιχα με αυτά του 20^{ου} αιώνα. Κατακρίνουν το γράφημα "hockey stick" ως ένα εσφαλμένο προϊόν προσομοίωσης που σκόπιμα αποκρύπτει και παραχαράσσει ιστορικά στοιχεία. Θεωρούν ότι ο 20^{ος} αιώνας δεν υπήρξε ούτε ο θερμότερος αιώνας, ούτε κι αυτός με τις πιο ακραίες κλιματικές αλλαγές.

- ***Υπάρχει μια στενή συσχέτιση μεταξύ της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του CO_2 και της παγκόσμιας θερμοκρασίας.***

Φαίνεται να υπάρχει μια ανακολουθία μεταξύ των τάσεων της θερμοκρασίας και της μεταβολής στη συγκέντρωση του CO_2. Σύμφωνα με τις μετρήσεις της IPCC όσον αφορά τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης, παρατηρήθηκε αύξηση αυτής κατά 0.6 ^{o}C κατά τον τελευταίο αιώνα. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της αύξησης καταγράφηκε πριν από το 1940, ενώ το 80% της συνολικής αύξησης της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα σημειώθηκε μετά το 1940. Μάλιστα από τα τέλη του 1930 έως τα τέλη του 1970 η γήινη ατμόσφαιρα ψυχράθηκε παρά την αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης CO_2.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα θεωρείται ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των θερμοκρασιών και των συγκεντρώσεων CO_2. Πρόσφατες όμως έρευνες βασισμένες σε πυρήνες παγόβουνων ηλικίας μεγαλύτερης των 1000 ετών, κατέδειξαν ότι η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO_2 ακολουθεί τη θερμοκρασιακή μεταβολή, και όχι το αντίστροφο. Τα παραπάνω στοιχεία ωθούν προς την κατεύθυνση ότι η μεταβολή των επιπέδων συγκέντρωσης CO_2 δεν είναι η γενεσιουργός αιτία των κλιματικών αλλαγών. Υπάρχουν βάσιμες υποψίες ότι οι κλιματικές αλλαγές συνδέονται με τη μεταβλητότητα της εκπεμπόμενης ηλιακής ενέργειας, οι οποίες μέχρι τώρα δεν έχουν όμως αποδειχθεί.

- ***Τα κλιματολογικά μοντέλα παρέχουν αξιόπιστες προβλέψεις των κλιματικών αλλαγών.***

Τα κλιματολογικά μοντέλα δεν είναι τίποτα περισσότερο από προσομοιώσεις ηλεκτρονικών υπολογιστών για το παγκόσμιο κλίμα. Ακόμη και οι επιστήμονες που τα κατασκευάζουν παραδέχονται ότι είναι αδύνατο να ενσωματώσουν την επίδραση όλων των παραμέτρων, που ενδέχεται να προσεγγίζουν τα 5 εκατομμύρια. Ειδικότερα ορισμένοι παράγοντες όπως ο ρόλος των σύννεφων, του ήλιου και της κοσμικής ακτινοβολίας στον κύκλο του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι εκ της φύσεως τους αδύνατο να προσομοιωθούν.

Στην πρώτη περίοδο χρησιμοποίησης τους τα παγκόσμια κλιματολογικά μοντέλα προέβλεπαν πολύ υψηλές αυξήσεις των θερμοκρασιών. Με την πάροδο του χρόνου εξελίχθηκαν και αντίστοιχα μειώθηκαν και οι εκτιμήσεις τους για την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το έτος 2100. Από 3.3 ^{o}C το 1990, σε 2.8 ^{o}C το 1992, και σε 2 ^{o}C το 1996. Από το 2001 και έπειτα η IPCC έπαψε να δημοσιεύει συγκεκριμένες εκτιμήσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας, και παρέχει απλώς το φάσμα των πιθανών θερμοκρασιακών μεταβολών.

Οι προβλέψεις των κλιματολογικών μοντέλων είναι μικρής αξίας, μέχρις ότου αποδειχθούν πιο αξιόπιστα. Άλλωστε αποτελούν μόνο υποθέσεις μέχρι τα εμπειρικά δεδομένα να αποδείξουν την ορθότητά τους.

- ***Η υπερθέρμανση του πλανήτη προκαλεί ακραία καιρικά φαινόμενα.***

Συχνά λέγεται ότι οι πλημμύρες, οι ξηρασίες και η αυξημένη συχνότητα εμφάνισης τυφώνων είναι αποδείξεις της παγκόσμια υπερθέρμανσης. Ωστόσο και η IPCC στην έκθεση του έτους 1996 σημείωνε ότι “δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι τα ακραία καιρικά

φαινόμενα έχουν αυξηθεί σε παγκόσμια κλίμακα κατά τον 20^{ο} αιώνα" ενώ η έκθεση του 2001 πρόσθετε ότι " καμία συστηματική μεταβολή στη συχνότητα εμφάνισης τυφώνων, κεραυνών και χαλαζοπτώσεων δεν είναι εμφανής". Μάλιστα στην περιφέρεια του Ατλαντικού Ωκεανού ο αριθμός των τυφώνων μειώθηκε κατά τις δεκαετίες 1970 και 1980, ενώ κατά την τετραετία 1991-1994 παρατηρήθηκε ο μικρότερος αριθμός τυφώνων σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη τετραετία κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα. Σύμφωνα μάλιστα με μερίδα επιστημόνων οι αυξημένες θερμοκρασίες πιθανότατα οδηγούν σε σταθεροποίηση του κλίματος.

- ***Οι πόλοι της Γης θερμαίνονται, τα παγόβουνα διαλύονται και λιώνουν, και η στάθμη της θάλασσας ανυψώνεται.***

Το γεγονός είναι ότι η γη μεταβάλλεται. Όχι μόνο τώρα αλλά εδώ και εκατομμύρια χρόνια. Συνολικά έχουν καταγραφεί τουλάχιστον 33 περίοδοι, όπου οι παγετώνες διαλύονταν και ανασχηματίζονταν. Σήμερα η δυτική Αρκτική μπορεί να γίνεται κάπως θερμότερη εξαιτίας κυκλικών φαινομένων στον Ειρηνικό Ωκεανό, όμως η ανατολική Αρκτική και η Γροιλανδία ψυχραίνονται. Η μικρή πράσινη χερσόνησος της Ανταρκτικής γίνεται θερμότερη, ενώ το κύριο σώμα της Ανταρκτικής ψυχραίνεται. Το πάχος των παγόβουνων αυξάνει τόσο στη Γροιλανδία όσο και στην Ανταρκτική.

Όσον αφορά την ανύψωση της στάθμης των θαλασσών πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σταθερά από την τελευταία περίοδο των παγετώνων, και δεν υπάρχει καμία ένδειξη επιτάχυνσής του κατά τον 20^{ο} αιώνα.

Με την παράθεση των παραπάνω σημείων ολοκληρώνεται και η περιγραφή της αντίθετης άποψης σχετικά με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι ισχυρισμοί και αυτής της πλευράς φαντάζουν αρκετά πειστικοί. Ίσως τελικά η λύση σε αυτό το πολυσύνθετο πρόβλημα θα μπορούσε να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τη γνωστή διαλεκτική μέθοδο του Hegel που υπαγορεύει ότι η σύνθεση δύο αντίθετων απόψεων οδηγεί τελικά στην επίλυση του προβλήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- Anderson D.R., D.J. Sweeney, T.A. Williams, An Introduction to Management Science, 11th Edition, Thomson South-Western, U.S.A., 2005.
- Biermann H. Scott, Luis Florentin Fernandez, Game theory with economic applications, Addison-Wesley Pub.Co., 1993.
- Carraro, C., Marchiori C. (2003), Stable Coalitions. Forthcoming in Carraro, C. (ed.), Endogenous Formation of Economic Coalitions, Edward Elgar, Cheltenham, UK.
- Davis Morton D., Game theory: A Nontechnical Introduction, Basic Books,Inc. Publishers, New York, 1970.
- Dresher Melvin, Games of Strategy: theory and applications, RAND Corporation, Prentice Hall, 1961.
- Dresher Melvin, The mathematics of games of strategy: theory and application, New York: Dover, 1981.
- Dutta Prajit K., Strategies and games: theory and practice, Cambridge, Mass: MIT Press, 1999.
- Fankhauser, S. (1995), Valuing climate change. The economics of the greenhouse, Earth scan, London.
- Finus, M. (2001), Game Theory and International Environmental Cooperation, Edward Elgar, Cheltenham.
- Friedmann James W., Game theory with applications to economics, Oxford University Press, New York, 1990.
- Glover Peter C., Michael J. Economides, Energy and Climate Wars: How naive politicians, green ideologues, and media elites are undermining the truth about energy and climate, The Continuum International Publishing Group, New York, 2010.
- Mendelson Elliot, Introducing game theory and its applications, Chapman & Hall/CRC, 2004.
- Moore L.J., S.M. Lee, B.W. Taylor, Management Science, 4th Edition, Allyn and Bacon, U.S.A., 1992.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (2000). "Special report on emissions scenarios, a special report of working III of the intergovernmental panel on climate change", Cambridge University Press, Cambridge.
- Nordhaus, W.D., Boyer, J. (1999), Roll the DICE again: economic models of global warming, Yale University, New Haven.

- Saul Stahl, A gentle introduction to game theory, American Mathematical Society, 1999.
- Watson Joel, An Introduction to game theory, W.W.Norton, New York, 2008.
- Weikard, H. P.(2009). "Cartel stability under an optimal sharing rule." The Manchester School, 77(5), 599–616.
- Winston Wayne L., S. Christian Albright, Practical Management Science, Duxbury Press, U.S.A., 1997.
- Winston Wayne L., Operations Research, 4th Edition, Thomson, Canada, 2004.
- Αλιπράντης Χ.Δ., S.K. Chakrabarti, Παίγνια και Λήψη Αποφάσεων, Εκδόσεις Ελληνικής Μαθηματικής Εταιρίας, Αθήνα, 2004.
- Οικονόμου Γεώργιος Σ., Ανδρέας Κ. Γεωργίου, Ποσοτική Ανάλυση για τη Λήψη Διοικητικών Αποφάσεων, Τόμος Α', Εκδόσεις Μπένος, Αθήνα, 1999.
- Οικονόμου Γεώργιος Σ., Ανδρέας Κ. Γεωργίου, Ποσοτική Ανάλυση για τη Λήψη Διοικητικών Αποφάσεων, Τόμος Β', Εκδόσεις Μπένος, Αθήνα, 2000.

Δικτυακοί τόποι

- http://www.econlib.org/library/Enc
- http://www.econ.canterbury.ac.nz/personal_pages/paul_walker/gt/hist.htm
- http://www.eia.doe.gov/emeu/iea
- http://www.fliiby.com/file/810911/94ns8juuik.html
- http://www.friendsofscience.org
- http://www.gametheory.net/
- http://www.gametheorysociety.org/
- http://www.gams.com
- http://www.ilog.com/products/cplex
- http://www.ipcc.ch
- http://www.prisoners-dilemma.com/
- http://www.unfccc.int
- http://www.virtualperfection.com/gametheory/
- http://www.wikipedia.org/

Δημοσιεύσεις

- Altamirano-Cabrera, J.C., Finus, M. (2005), "Permit trading and stability of international climate agreements", Journal of Applied Economics, 1, 19-47.
- Ansuategi, A. (2003), "Economic growth and transboundary pollution in Europe: An empirical analysis", Environmental and Resource Economics, 26, 305-328.
- Barazini, A., Chesney, M., Morisset J. (2003), "The impact of possible climate catastrophes on global warming", Energy policy, 31, 691-701.
- Barrett, S.(1994). "Self enforcing international environmental agreements", Oxford Economic Papers, 46, 878–894.
- Carraro, C., Siniscalco, D. (1992). "The international dimension of environmental policy", European Economic Review, 36, 379–387.
- Carraro, C. (2000). "Roads towards International Environmental Agreements", The Economics of International Environmental Problems, Mohr Siebeck, Tübingen, pp. 169-202.
- Chander, P., Tulkens, H. (1997). "The core of an economy with multilateral environmental externalities", Int J Game Theory, 26(3), 379–401.
- Eyckmans, J., Tulkens, H. (2003). "Simulating coalitionally stable burden sharing agreements for the climate change problem.", Resource and Energy Economics, 25(4), 299–327.
- Eyckmans, J., Finus, M.(2004), "New roads to International Environmental agreements : The case of Global Warming", FEEM working paper no.88,2003, second draft.
- Eyckmans, J., Finus, M. (2006), "Measures to enhance the success of global climate treaties", International Environmental Agreements, 7, 73-97.
- Fankhauser, S., 1995. "Valuing climate change - the economics of the greenhouse", Earthscan Publications.
- Finus, M.& Rundshagen, B.(2003). "Endogenous coalition formation in global pollution control : a partition function approach. InC. Carraro (Ed.)", The endogenous formation of economic coalitions (pp.199–243).Cheltenham: Edward Elgar.
- Finus, M. (2003a), "Stability and Design of International Environmental Agreements: The Case of Transboundary Pollution. In: Folmer, H. and T. Tietenberg (eds.)", International Yearbook of Environmental and Resource Economics, 2003/4, Edward Elgar, Cheltenham, UK, ch. 3, pp. 82-158.
- Finus, M. (2003b), "New Developments in Coalition Theory: An Application to the Case of Global Pollution. In: Marsiliani, L., Rauscher, M. and Withagen, C. (eds.)",

Environmental Policy in an International Perspective, Kluwer, Dordrecht, Holland, pp. 19-49.

- Finus, M. (2004) . "International cooperation to resolve international pollution problems", Nota Di Lavoro 41, 2004, FEEM, Venice, Italy.
- Finus, M., Van Ierland, E., & Dellink, R.(2006)."Stability of climate coalitions in a cartel formation game", Economics of Governance, 7, 271–291.
- Germain, M., Toint, P.T., Tulkens, H. (1999). "Transferts financiers et optimum cooperative international en matière de pollutions-stocks", L' Actualité Économique, Revued' analyse économique ,75(1-2-3), 427–445.
- Hackl, F., Pruckner G.J, 2002. "How global is the solution to global warming?", Economic Modelling, 20 (2002), 93-117.
- Kaushik Basu (1994), "The Traveler's Dilemma: Paradoxes of Rationality in Game Theory", American Economic Review, 84, 2, 391-395.
- Labriet, M., Loulou, R. (2003). "Coupling climate damages and GHG abatement costs in a linear programming framework", Environmental Modelling & Assessment, 8, 261–274.
- Labriet, M., Loulou, R., Kanudia, A. (2005). "Global energy and CO_2 emission scenarios: analysis with a 15-region World MARKAL model. In: Haurie A, Viguier L(eds)The coupling of climate and economic dynamics, advances to global change research", Springer, Dordrecht, 22, 205–235.
- Labriet, M., Loulou, R., (2008). "How crucial is cooperation in Mitigating World Climate? Analysis with World-Markal", Computational Management, 5, 67-94.
- Nagashima, M., Dellink, R., van Ierland, E.C.,& Weikard, H.-P.(2009). "Stability of international climate coalitions A comparison of transfer schemes" Ecological Economics, 68, 1476–1487.
- Nordhaus, W.D., 1994. "Managing the global commons _ the economics of climate change", MIT Press, Cambridge, MA.
- Nordhaus W.D., Yang, Z.(1996). "A regional dynamic general equilibrium model of alternative climate-change strategies", American Economic Review, 86, 741–765.
- Oliveira-Martins, J., Burniaux, J.-M., Maitin, J.P., Nicoletti, G., 1992. "The costs of reducing CO2 emissions: a comparison of carbon tax curves with GREEN", Economics Department Working Papers 118. OECD.
- Riahi, K., Roehrl, R.A (2000). "Energy technology strategies for carbon dioxide mitigation and sustainable development", Environmental Economics and Policy Studies, 3, 89–123.
- Schmeidler, D. (1969). "The nucleolus of a characteristic function game", SIAM Journal of Applied Mathematics, 17, 1163–1170.

- Shapley, L.S. (1953). “A value for N-person games. In: Kuhn, H.W., Tucker, A.W. (eds): Contributions to the Theory of Games II”, Annals of Mathematics studies, No.2.Princeton University Press, Princeton, pp307–317.
- Tol, R.S.J., 1995. “The damage costs of climate change towards more comprehensive calculations”, Environmental and Resource Economics, 5, 353-374.
- Weikard, H. P.(2009). “Cartel stability under an optimal sharing rule.” The Manchester School, 77(5), 599–616.
- Weikard, H.-P., Dellink, R.,& Van Ierland, E.(2010). “Renegotiations in the greenhouse”, Environmental and Resource Economics, 45, 573–596.
- Weikard, H.-P., Dellink, R., (2010). “Sticks and carrots for the design of international climate agreements with renegotiations”, Annals of operations research, DOI : 10.1007/s10479-010-0795-x.