ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: Σχεδιασμός, Ανάλυση και Ανάπτυξη Διεργασιών και Συστημάτων

Επίλυση προβλημάτων Μαθηματικού Προγραμματισμού με το Microsoft Solver Foundation Excel Add-in

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΟΛΥΖΟΣ ΛΑΜΠΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΑΥΡΩΤΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών του συγγραφέως στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να εκφράσω από καρδίας τις ευχαριστίες μου στον κ. Μαυρωτά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και στην οικογένεια μου για τη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πολύζος Λάμπρος
Αθήνα, Μάϊος 2013

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ουσιαστικά έναν οδηγό χρήσης του πρόσθετου για το Excel του Microsoft Solver Foundation. Ξεκινά αναλύοντας τις έννοιες «μοντέλο» και «μαθηματικός προγραμματισμός» και περιγράφει τη διαδικασία μοντελοποίησης. Απαντά σε ερωτήματα όπως τι είναι το MSF κι η γλώσσα OML κι επικεντρώνεται στις λειτουργίες που συνδέονται άμεσα με το Excel. Στη συνέχεια μέσω ενός σχετικά απλού προβλήματος συστήνει τον αναγνώστη στη χρήση των βασικών λειτουργιών του πρόσθετου και τέλος γίνεται εφαρμογή ενός πιο σύνθετου προβλήματος προς ανάδειξη των πλεονεκτημάτων που προσφέρει.

Λέξεις-Κλειδιά: Μοντέλο, Μαθηματικός Προγραμματισμός, (ΜΠ), Βελτιστοποίηση μοντέλου, Microsoft Solver Foundation (MSF), OML, Excel, Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (MIP), Monte Carlo Simulation

Abstract

This thesis is essentially a User’s Guide of Microsoft Solver Foundation for Excel Add-in. It begins analyzing the concepts of “model” and “mathematical programming” and describes the modeling process. It answers questions as “What is MSF?” or “What is OML?” and it focuses on the functions that relate them with Excel. In advance, it introduces the reader into the basic functions and usage of the add-in using a relatively simple problem and finally a more complex problem is implemented in order to highlight the benefits the add-in has to offer.

Keywords: Model, Mathematical Programming (MP), Modeling Optimization, Microsoft Solver Foundation (MSF), OML, Excel, Modeling Optimization, Mixed Integer Programming (MIP), Monte Carlo Simulation

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Αντικείμενο

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει κύριο σκοπό να συστήσει τον χρήστη στις βασικές δομές του προγράμματος καθώς και να τον παροτρύνει και να τον εξοικειώσει στη χρήση του. Πρώτον γίνεται μία βιβλιογραφική σύνοψη στη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του και στη συνέχεια εφαρμογή ενός παραδείγματος από τη βιβλιογραφία, ώστε να αναδειχθούν πλεονεκτήματα ή και μειονεκτήματα αυτού έναντι άλλων προσεγγίσεων επίλυσης.

1.2 Δομή διπλωματικής

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση της έννοιας του μοντέλου και τα οφέλη του, τι είναι μαθηματικός προγραμματισμός και τα παρακλάδια του και μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας επιχειρείται μια πρώτη προσέγγιση στο τι είναι το MSF και της χρησιμότητάς του, καθώς και της υπεροχής του μέσω σύγκρισης με σχετικά προγράμματα.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η βασική δομή ενός μοντέλου OML και στη συνέχεια δίνονται διευκρινήσεις στα χαρακτηριστικά των μερών του και οδηγίες στη χρήση τους προς την κατασκευή ενός καλά δομημένου μοντέλου. Δίνεται έμφαση στα στοιχεία της OML που συνδέονται κατά κύριο λόγο με τη χρήση του πρόσθετου για το Excel και όχι στα χαρακτηριστικά της που έχουν να κάνουν με ανεξάρτητη απ' αυτό χρήση.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται λεπτομερής περιγραφή των λειτουργιών του πρόσθετου για το Excel και περιγραφή του τρόπου χρήσης του, καθώς και των ιδιαιτεροτήτων του που πρέπει να προσέχουμε κατά τη χρήση του αυτή. Για την καλύτερη κατανόησή του εφαρμόζουμε ένα απλό μοντέλο, ώστε να γίνουν πιο διακριτά τα χαρακτηριστικά του προγράμματος.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται προσαρμογή στο Excel ενός "real-life" μοντέλου που αρχικά αναπτύχθηκε σε περιβάλλον GAMS. Αρχικά γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του προβλήματος και ακολούθως η μαθηματική μοντελοποίησή του. Στη συνέχεια γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή των βημάτων προσαρμογής του μοντέλου στο Excel, από την εισαγωγή των δεδομένων στο φύλλο εργασίας μέχρι την επίλυσή του, με συνεχείς αναφορές σε προηγούμενες ενότητες και διευκρινήσεις σε ιδιαιτερότητες του πρόσθετου. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στις λειτουργίες που ενσωματώσαμε, ώστε να υλοποιηθεί επιτυχώς η προσομοίωση Monte Carlo.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

2. Μαθηματικός Προγραμματισμός

2.1 Εισαγωγή

Ο μαθηματικός προγραμματισμός (mathematical programming, MP) είναι ίσως η πιο ανεπτυγμένη και περισσότερο χρησιμοποιημένη τεχνική υποστήριξης αποφάσεων στην οικονομία και διοίκηση. Έχει ως αντικείμενο την βέλτιστη κατανομή περιορισμένων μέσων ή πόρων μεταξύ διάφορων ανταγωνιστικών δραστηριοτήτων κάτω από συνθήκες βεβαιότητας.

Πρέπει να τονιστεί ότι ο μαθηματικός προγραμματισμός είναι πολύ διαφορετικός από τον προγραμματισμό ηλεκτρονικών υπολογιστών (computer programming). Ο μαθηματικός προγραμματισμός εμπεριέχει την έννοια του «σχεδιασμού». Η λέξη «προγραμματισμός» είναι ατυχής, αφού δεν έχει να κάνει απαραίτητα με υπολογιστές. Αναπόφευκτα, ο μαθηματικός προγραμματισμός εμπλέκεται με την πληροφορική, καθώς πρακτικά προβλήματα συμπεριλαμβάνουν πάντα μεγάλες ποσότητες δεδομένων και πράξεων, που μπορούν να αντιμετωπιστούν άνετα με την επεξεργαστική ισχύ ενός υπολογιστή.

Η τεχνική του μαθηματικού προγραμματισμού εφαρμόζεται σε μοντέλα. Ας δούμε λοιπόν αναλυτικότερα τι είναι ένα μοντέλο.

2.2 Τί είναι ένα μοντέλο

Πολλές εφαρμογές στην επιστήμη κάνουν χρήση μοντέλων. Ο όρος «μοντέλο» χρησιμοποιείται συνήθως για μια κατασκευή που έχει φτιαχτεί με στόχο να αναδείξει κάποια χαρακτηριστικά ενός άλλου αντικειμένου. Γενικά, μόνο κάποια απ’ αυτά τα χαρακτηριστικά θα διατηρηθούν στο μοντέλο, που εξαρτάται από τη χρήση στην οποία υπόκειται. Αποτελεί δηλαδή, εν συντομία, ένα πρωτότυπο από κάτι πραγματικό. Ένα τέτοιο πρωτότυπο μπορεί να είναι κάτι συγκεκριμένο (concrete) ή αφηρημένο (abstract). Συγκεκριμένο, απτό, μοντέλο είναι για παράδειγμα ένα μοντέλο αεροσκάφους, που θα χρησιμοποιηθεί σε πειράματα σε τούνελ αέρα. Συχνότερα, στην επιχειρησιακή έρευνα, μας απασχολούν τα αφηρημένα μοντέλα. Αυτά τα μοντέλα είναι συνήθως μαθηματικά, υπό την έννοια ότι χρησιμοποιούνται αλγεβρικοί συμβολισμοί που αντικατοπτρίζουν τις εσωτερικές αλληλεπιδράσεις του αντικειμένου (συνήθως ενός οργανισμού) που μοντελοποιείται. Η προσοχή μας οριοθετείται κυρίως σε τέτοια μαθηματικά μοντέλα, αν κι ο όρος «μοντέλο» χρησιμοποιείται πολλές φορές ευρύτερα, ώστε να συμπεριλάβει καθαρά περιγραφικά μοντέλα. Στην ενότητα 2.4 προχωρούμε σε περαιτέρω ανάλυση των μαθηματικών μοντέλων, αλλά πρώτα λίγα λόγια για τα οφέλη ενός μοντέλου.

2.3 Γιατί χρησιμοποιούμε μοντέλα

Το ουσιώδες χαρακτηριστικό ενός μαθηματικού μοντέλου στην επιχειρησιακή έρευνα είναι ότι περιλαμβάνει ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων (όπως ισότητες, ανισότητες και λογικές εξαρτήσεις) που αντιστοιχούν σε κάποιες «γήινες» συσχετίσεις στον πραγματικό κόσμο (όπως νόμοι της φύσης ή περιορισμοί μάρκετινγκ).

Υπάρχουν πολλά κίνητρα που παρακινούν στην κατασκευή ενός μοντέλου:

- Η ίδια η διεργασία κατασκευής ενός μοντέλου συχνά αποκαλύπτει σχέσεις που αρχικά μπορεί να μην ήμαστε σε θέση να διαπιστώσουμε, καθώς αναγκαζόμαστε να συγκεντρώσουμε όλα τα στοιχεία που επηρεάζουν το μοντέλο και το καθιστούν σαφές και ολοκληρωμένο. Σαν αποτέλεσμα, κατανοούμε καλύτερα το αντικείμενο, το οποίο μοντελοποιούμε.
- Έχοντας κατασκευάσει ένα μοντέλο είμαστε σε θέση να το αναλύσουμε μαθηματικά, το οποίο βοηθάει να προτείνουμε δράσεις που διαφορετικά δε θα ήταν εμφανείς. Επίσης, μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ αυτών των δράσεων και επιλογή της πιο ικανοποιητικής σε περίπτωση διαφωνίας.
- Ένα πρόβλημα μπορεί να είναι σύνθετο και πολύπλοκο. Η μοντελοποίηση βοηθά στη δόμηση, οργάνωση της πληροφορίας και παρέχει τη δυνατότητα φιλτραρίσματος αυτής, βάσει προτεραιοτήτων που καθορίζουμε εμείς.
- Κάποιες αποφάσεις μπορεί να είναι μη ανατρέψιμες ή ακριβές. Σ’ αυτές τις περιπτώσεις, είναι ωφέλιμο να είμαστε σε θέση να προβλέψουμε τις συνέπειες μιας απόφασης και να πειραματιστούμε με όλες τις διαθέσιμες επιλογές, όπου και πάλι η μοντελοποίηση βοηθά.
- Τέλος, ο συνδυασμός μοντέλων και υπολογιστών ενισχύει την ταχύτητα λήψης αποφάσεων. Οι υπολογιστές επιτρέπουν τη διαχείριση πολύ μεγαλύτερου όγκου πληροφορίας, απ’ όσο θα μπορούσε κάποιος να κάνει χειροκίνητα.

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι ένα μοντέλο καθορίζεται από τις σχέσεις τις οποίες ενσωματώνει. Αυτές οι σχέσεις είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητες των δεδομένων στο μοντέλο, καθώς ένα μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες περιπτώσεις και με διαφορετικά δεδομένα, όπως κόστη, τεχνολογικούς συντελεστές ή διαθεσιμότητα πόρων.

2.4 Μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού

Κοινό στοιχείο των μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού είναι ότι όλα απαιτούν βελτιστοποίηση (optimization). Επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε ή να ελαχιστοποιήσουμε κάτι. Η ποσότητα που επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε ή να ελαχιστοποιήσουμε είναι γνωστή σαν αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Ένα μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού αποτελείται από μια αντικειμενική συνάρτηση και από ένα σύνολο περιορισμών (δυναμικότητας, διαθεσιμότητας πόρων, τεχνολογίας, κλπ.), που εκφράζουν τους περιορισμούς του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο πρέπει να ληφθεί η απόφαση.

Τα βασικά συστατικά ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού είναι τα ακόλουθα:

- *Μεταβλητές απόφασης*: Εκφράζουν ουσιαστικά τους αγνώστους του προβλήματος και είναι οι μεταβλητές που ελέγχει ο αποφασίζων, δηλ. εκείνες των οποίων τις τιμές μπορεί να καθορίσει. Το σύνολο των μεταβλητών απόφασης αποτελεί ουσιαστικά το αντικείμενο της διαδικασίας λήψης απόφασης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης αποσκοπεί στο να βρεθούν οι τιμές εκείνες για τις μεταβλητές απόφασης οι οποίες βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση.
- *Αντικειμενική συνάρτηση*: Αποτελεί τη μαθηματική σχέση των μεταβλητών απόφασης που εκφράζει το κριτήριο βελτιστοποίησης. Επιδιώκεται είτε η ελαχιστοποίηση είτε η μεγιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Στα προβλήματα πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού (multiobjective mathematical programming) υπάρχουν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις (κριτήρια απόφασης), γι αυτό και τα προβλήματα αυτά αναφέρονται και ως προβλήματα διανυσματικής βελτιστοποίησης (vector optimization).
- *Περιορισμοί:* Είναι οι μαθηματικές σχέσεις που καθορίζουν τις τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Καθορίζουν δηλαδή το πεδίο ορισμού (εφικτό χώρο) του προβλήματος. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι ισότητες ή ανισοεξισώσεις.
- *Παράμετροι*: Είναι τα εξωγενώς οριζόμενα (εκτός του ελέγχου του αποφασίζοντος) μεγέθη του προβλήματος. Πρόκειται ουσιαστικά για τους γνωστούς όρους του προβλήματος οι οποίοι έχουν σταθερή τιμή στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Συνήθως είναι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης ή εκφράζουν ποσότητες απαραίτητες στη διαμόρφωση των περιορισμών (π.χ. την απαιτούμενη ζήτηση μιας δραστηριότητας).

2.5 Ο ρόλος των μαθηματικών

Αν και διαπραγματευόμαστε τον καθορισμό μαθηματικών προγραμμάτων (μοντέλα βελτιστοποίησης), αυτό δε σημαίνει ότι πρέπει να είμαστε και μαθηματικοί για να υλοποιήσουμε μια καλή μοντελοποίηση. Ο βαθμός της γνώσης μαθηματικών που απαιτείται εξαρτάται κάθε φορά από τον τύπο του μοντέλου που κατασκευάζουμε. Αναλύοντας το ρόλο των μαθηματικών, ξεχωρίζουμε τρεις πτυχές του: τη γλώσσα, τη θεωρία και τους αλγόριθμους.

2.5.1 Η γλώσσα των μαθηματικών

Τα μαθηματικά παρέχουν μια γλώσσα με την οποία μπορούμε να τυποποιήσουμε αφηρημένα μοντέλα χρησιμοποιώντας τα ακόλουθα στοιχεία:

- Μαθηματικές έννοιες όπως μεταβλητές (άγνωστοι) και παράμετροι (σύμβολα που αντιπροσωπεύουν γνωστά δεδομένα).
- Τελεστές όπως:
    - Αριθμητικοί τελεστές (+, -, κτλ.)
    - Σχεσιακοί τελεστές (=, <, >, κτλ.)
    - Λογικοί τελεστές (ΚΑΙ, Η, κτλ.)
- Δεδομένα που συνδέουν το μοντέλο με ένα πραγματικό πρόβλημα.

2.5.2 Μαθηματική θεωρία

Τα μαθηματικά παρέχουν ένα θεωρητικό πλαίσιο για την τυποποίηση και επίλυση των μοντέλων εκείνων, για τα οποία η μετάφραση του προβλήματος σε ένα μοντέλο δε μπορεί να είναι άμεση, ξεκάθαρη. Χρειάζονται τότε μαθηματικές έννοιες που θα συλλάβουν τις απτές και μη απτές πλευρές μιας πραγματικής κατάστασης. Ένα μη απτό παράδειγμα είναι η ελαχιστοποίηση του ρίσκου σε ένα μοντέλο επιλογής οικονομικού χαρτοφυλακίου. Συγκεκριμένος προσδιορισμός του τι είναι ρίσκο δεν υπάρχει, υπάρχουν όμως πολλές ερμηνείες. Όταν κατασκευάζουμε ένα μοντέλο πρέπει μια ή περισσότερες απ’ αυτές τις ερμηνείες να τεθούν επακριβώς υπό μορφή μαθηματικού τύπου για το ρίσκο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με χρήση των μαθηματικών εννοιών και τη σχετική θεωρία.

2.5.3 Μαθηματικοί αλγόριθμοι

Οι μαθηματικοί αλγόριθμοι χρειάζονται για τη λήψη λύσεων από ένα μαθηματικό μοντέλο. Ευτυχώς οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν ευρεία εφαρμογή και δίνουν λύσεις για ολόκληρες κατηγορίες μαθηματικών μοντέλων. Σαν κατασκευαστής μοντέλων δεν απαιτείται βαθιά γνώση αυτών των αλγορίθμων, καθώς είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο και άμεσα προσβάσιμοι από ένα σύστημα μοντελοποίησης. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις μοντέλων μεγάλης κλίμακας για τις οποίες οι αλγόριθμοι αυτοί δεν επαρκούν κι απαιτείται ανάπτυξη ειδικών αλγορίθμων.

2.6 Η διαδικασία μοντελοποίησης

Η διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου συνήθως περιλαμβάνει πολλές και διάφορες δράσεις. Παρακάτω αναφέρουμε μια σειρά αυτών των δράσεων, που μπορεί να επαναλαμβάνονται, όσο γίνεται διαθέσιμη επιπρόσθετη πληροφορία κατά την εκτέλεση των υπολοίπων βημάτων.

- Καθορισμός στόχου
- Συμβουλή βιβλιογραφίας και άλλων ανθρώπων
- Τυποποίηση του μοντέλου και συλλογή δεδομένων
- Αρχική δοκιμή
- Επαλήθευση

Σ' ένα πολύπλοκο πρόβλημα, η δομή κι ο στόχος ενός μοντέλου μπορεί να μην είναι εμφανείς. Γι' αυτό, πρώτο βήμα θα πρέπει να είναι η ανάλυση του γενικότερου προβλήματος εννοιολογικά και η απόφαση ποιων μερών μιας πραγματικής κατάστασης θα πρέπει να περιληφθούν. Σ' αυτή τη φάση δίνεται έμφαση στον καθορισμό του προβλήματος, παρά στα μαθηματικά που πρέπει να εφαρμοστούν. Είναι πιθανή η ύπαρξη διαφορετικών απόψεων ενός προβλήματος και των συνεπειών τους, που πρέπει να συγκλίνουν ώστε να συμφωνηθεί ο στόχος ενός μοντέλου. Μπορούμε να πούμε ότι ο στόχος ενός μοντέλου είναι η υποστήριξη μιας απόφασης. Γενικότερα ένα μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει τις συνέπειες συγκεκριμένων αποφάσεων και να συγκρίνει εναλλακτικές.

Αφού αποφασιστεί ο στόχος του μοντέλου, το επόμενο βήμα είναι να ερευνήσουμε αν έχει αναπτυχθεί παρόμοιο μοντέλο. Τα οφέλη μιας τέτοιας έρευνας είναι ότι μπορεί να βρούμε τα δεδομένα που χρειαζόμαστε ή κάποια βοηθητικά στοιχεία ως προς το πώς θα τυποποιήσουμε το μοντέλο μας. Γενικά, απαιτείται συνήθως κάποια προσαρμογή.

Σε πολλές περιπτώσεις, η συλλογή δεδομένων αποτελεί και το δυσκολότερο εγχείρημα. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα και επιρρεπής σε λάθη. Τα περισσότερα μοντέλα αναπτύσσονται για να αναλύσουν πραγματικά προβλήματα και απαιτούν πληθώρα δεδομένων. Πολλές φορές τα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε βιβλιοθήκες δεδομένων. Άλλες φορές τα δεδομένα μπορεί να μην είναι άμεσα διαθέσιμα κι όταν βρεθούν να απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία για να ανταποκριθούν στο σκοπό μας. Κατά την προσαρμογή αυτή μπορεί να προκύψουν διάφορα λάθη, όπως τυπογραφικά λάθη, λάθη ακρίβειας ή συνέχειας.

Συνήθως δε φαίνεται εκ των προτέρων, ποιος θα είναι ο καταλληλότερος τύπος μορφοποίησης ενός μοντέλου, καθώς δεν υπάρχουν σαφείς κανόνες επιλογής ενός συγκεκριμένου. Οι επιλογές άλλων κατασκευαστών μοντέλων μπορεί να δώσουν κατευθύνσεις και μαζί με την ατομική εμπειρία και γνώση να καταλήξουμε σε μια τελική επιλογή. Σε κάθε περίπτωση, όταν μένουμε στα όρια των διαθέσιμων εργαλείων μοντελοποίησης, μπορεί να χρειαστεί να συμβιβαστούμε.

Συνιστάται να ξεκινάμε με ένα μικρό μοντέλο που θα εμπεριέχει μόνο τις βασικές συσχετίσεις του προβλήματος. Θα πρέπει να διαπιστώσουμε ότι έχουν τυποποιηθεί σωστά πριν προχωρήσουμε σε προσθήκη άλλων, που θα αυξήσουν την πολυπλοκότητα του μοντέλου και συνεχίζουμε σταδιακά.

Επαλήθευση είναι η διαδικασία ελέγχου της συμφωνίας των αποτελεσμάτων του αρχικού μοντέλου υπό πραγματικές συνθήκες. Είναι ένα σημαντικό βήμα πριν τα αποτελέσματα του μοντέλου χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη μιας απόφασης. Δυο περιπτώσεις μπορεί να προκύψουν:

- Η μεθοδολογία υπάρχει ήδη με τον ίδιο σκοπό με το νέο μοντέλο.

Για να είμαστε αξιόπιστοι, πρέπει να αποδείξουμε ότι τα αποτελέσματα του νέου μοντέλου είναι τόσο καλά όσο κι αυτά που παρήχθησαν με μια υπαρκτή μέθοδο. Καθώς η παλιά μέθοδος είναι πιθανόν ήδη να είναι γνωστή για την ακρίβειά της (ή τις αδυναμίες της), μπορούμε να συγκρίνουμε τις δυο μεθόδους μαζί. Το μοντέλο μας θα πρέπει να αναπαράγει τουλάχιστον τα παλιά αποτελέσματα και να στοχεύσει σε καλύτερα.

- Δεν υπάρχει παρόμοια μεθοδολογία.

Σ' αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να ανατρέξουμε σε ιστορικά δεδομένα και να προσπαθήσουμε να αναπαράγουμε το παρελθόν. Με άλλα λόγια προσπαθούμε να προβλέψουμε κάτι που είναι ήδη γνωστό.

2.7 Κλάδοι μαθηματικού προγραμματισμού

Ο μαθηματικός προγραμματισμός περιλαμβάνει μια σειρά από τεχνικές ανάλογα με τις προϋποθέσεις που ισχύουν στο κάθε πρόβλημα. Ο γραμμικός προγραμματισμός (linear programming) είναι ο πιο γνωστός κλάδος του μαθηματικού προγραμματισμού. Προϋποθέτει ότι οι συναρτήσεις στόχου και περιορισμών είναι γραμμικές και οι μεταβλητές αποφάσεων μπορούν να πάρουν όχι μόνο ακέραιες, αλλά και δεκαδικές τιμές. Άλλος επίσης γνωστός και ιδιαίτερα σημαντικός κλάδος του μαθηματικού προγραμματισμού, είναι ο ακέραιος προγραμματισμός, ο οποίος εφαρμόζεται όταν όλες οι μεταβλητές απόφασης οφείλουν να πάρουν ακέραιες τιμές. Ένας τρίτος γνωστός κλάδος του μαθηματικού προγραμματισμού είναι ο μη γραμμικός προγραμματισμός (non linear programming), όπου μερικές από τις συναρτήσεις του προβλήματος (αντικειμενική συνάρτηση ή/και περιορισμοί) είναι μη γραμμικές.

Όταν οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το πρόβλημα (αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί), είναι γραμμικές ως προς τις μεταβλητές απόφασης τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού κυρίως λόγω των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών τους και την ευκολία επίλυσης τους. Με τη μέθοδο Simplex και τις παραλλαγές της να κυριαρχούν στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων εδώ και 60 περίπου χρόνια, προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού με χιλιάδες μεταβλητές απόφασης και περιορισμούς, επιλύονται σήμερα σε ελάχιστο χρόνο. Αντίθετα, η επίλυση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού είναι πιο δύσκολη υπόθεση και καταλήγει σε τοπικά βέλτιστα. Για τους λόγους αυτούς, επιδιώκεται στις περισσότερες περιπτώσεις τα πραγματικά προβλήματα να μοντελοποιούνται ως προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού προσφεύγοντας αρκετές φορές σε προσεγγίσεις μη γραμμικών συστημάτων με γραμμικές σχέσεις.

Μία άλλη ταξινόμηση, είναι ανάλογα με το είδος των μεταβλητών απόφασης, αν δηλαδή είναι συνεχείς μεταβλητές ή ακέραιες. Τα προβλήματα που έχουν μόνο συνεχείς μεταβλητές είναι πιο εύκολο να λυθούν σε σχέση με αυτά που έχουν ακέραιες μεταβλητές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το εφικτό χωρίο σε ένα πρόβλημα με ακέραιες μεταβλητές παρουσιάζει ασυνέχειες δυσκολεύοντας έτσι κατά πολύ τη διαδικασία επίλυσης. Από την άλλη μεριά όμως η δυνατότητα χρήσης ακεραίων μεταβλητών δίνει τη δυνατότητα μιας πιο ρεαλιστικής μοντελοποίησης της πραγματικότητας και επίσης επεκτείνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του μαθηματικού προγραμματισμού και σε προβλήματα που έχουν συνδυαστικό χαρακτήρα (συνδυαστική βελτιστοποίηση), τα οποία χωρίς τη χρήση ακεραίων μεταβλητών θα ήταν αδύνατο να λυθούν. Στο 95% των περιπτώσεων οι ακέραιες μεταβλητές που συναντώνται σε μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού είναι δυαδικές μεταβλητές, δηλαδή παίρνουν τιμή 0 ή 1. Αν ένα μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού έχει αποκλειστικά ακέραιες μεταβλητές χαρακτηρίζεται ως **μοντέλο ακέραιου προγραμματισμού**. Αν έχει και συνεχείς και ακέραιες μεταβλητές χαρακτηρίζεται ως **μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού** (mixed integer programming). Η επίλυση προβλημάτων ακέραιου και μικτού ακέραιου προγραμματισμού γίνεται συνήθως με τη μεθοδολογία «κλάδου και φράγματος» (branch and bound), μια τεχνική συστηματικής εξερεύνησης του πεδίου των δυνατών λύσεων. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι παράμετροι ενός μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού μπορεί να μην εκφράζονται με πραγματικούς αριθμούς αλλά με κατανομές πιθανότητας ή με ασαφείς αριθμούς, απεικονίζοντας έτσι την αβεβαιότητα ως προς την τιμή τους. Τότε το πρόβλημα ανάγεται αντίστοιχα σε πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού (stochastic programming) ή ασαφούς προγραμματισμού (fuzzy programming). Τα τελευταία χρόνια μάλιστα έχει αρχίσει να απασχολεί ιδιαίτερα η διαχείριση της αβεβαιότητας ως προς τις παραμέτρους ενός μοντέλου, ξεφεύγοντας από τις απλές μορφές ανάλυσης ευαισθησίας που μπορεί να προσφέρει και ο μαθηματικός προγραμματισμός.

Τέλος, όταν υπάρχουν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις (όπως και στην προκειμένη περίπτωση), το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως **πρόβλημα πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού** (multiobjective programming, multiobjective optimization). Ο όρος πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι ταυτόσημος με τον όρο διανυσματική βελτιστοποίηση (vector optimization) σε αντιδιαστολή με την μονοδιάστατη βελτιστοποίηση (scalar optimization) που πραγματεύεται ο συμβατικός μαθηματικός προγραμματισμός. Ο πολυκριτηριακός μαθηματικός προγραμματισμός έκανε την εμφάνισή του τη δεκαετία του 70, όταν η θεώρηση περισσοτέρων από μιας αντικειμενικών συναρτήσεων άρχισε να καθορίζει ένα πιο ρεαλιστικό πλαίσιο μοντελοποίησης των πολύπλοκων προβλημάτων του μάνατζμεντ.

2.7.1 Ακέραιος και Μικτός ακέραιος Προγραμματισμός

Μία από τις προϋποθέσεις εφαρμογής του συνεχούς γραμμικού προγραμματισμού είναι η διαιρετότητα των μεταβλητών απόφασης. Σε ένα κλασσικό (συνεχές) γραμμικό πρόγραμμα, οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε πραγματική τιμή. Υπάρχει, όμως ένας σημαντικός αριθμός προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, στα οποία όλες οι μεταβλητές, ή μερικές από αυτές, υποχρεούνται να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές. Τέτοιες μεταβλητές είναι, για παράδειγμα, αυτές που δηλώνουν αριθμό εργατών, αριθμό εργοστασιακών μονάδων, αποφάσεις χρηματοδότησης ή μη χρηματοδότησης ενός έργου, κλπ. Τα προβλήματα του γραμμικού προγραμματισμού στα οποία όλες ανεξαίρετα οι μεταβλητές απόφασης περιορίζονται να πάρουν ακέραιες τιμές, εμπίπτουν στο πεδίο του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Εκείνα, στα οποία ο περιορισμός ακεραιότητας δεν ισχύει για όλες τις μεταβλητές, αλλά για μερικές από αυτές, ονομάζονται προβλήματα μικτού ακέραιου προγραμματισμού, όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση που οι μεταβλητές είναι περιορισμένες να παίρνουν τιμές 0 ή 1. Το πρόβλημα αυτό καλείται πρόβλημα **δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού**. Μια σημαντική χρήση μιας δυαδικής μεταβλητής είναι να κωδικοποιήσουμε μια απόφαση μεταξύ δύο εναλλακτικών που θα πρέπει να ληφθεί στο πρόβλημα. Η τιμή που θα πάρει η μεταβλητή απόφασης κατά την επίλυση δείχνει ποια απόφαση πρέπει να επιλεγεί ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση.

Μία απλή μέθοδος επίτευξης ακέραιης λύσης σε ένα πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού συνίσταται στο να επιλυθεί με τη συνηθισμένη μέθοδο Simplex για συνεχή γραμμικό προγραμματισμό και στη συνέχεια, να στρογγυλευθούν στον πλησιέστερο ακέραιο οι τιμές των μεταβλητών οι οποίες παίρνουν ρητές τιμές. Μία τέτοια διαδικασία είναι πολύ επικίνδυνη, όσο απλή κι αν φαίνεται, γιατί μπορεί να καταλήξει είτε σε υποβέλτιστες λύσεις, κατώτερες δηλαδή της πραγματικά βέλτιστης ακέραιης λύσης, είτε σε λύσεις μη πραγματοποιήσιμες, που παραβιάζουν δηλαδή τουλάχιστον έναν από τους περιορισμούς του προβλήματος. Το πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού που προκύπτει από ένα πρόβλημα ακέραιου ή μικτού ακέραιου προγραμματισμού αν αφαιρέσουμε τη συνθήκη οι μεταβλητές να είναι ακέραιες, ονομάζεται το **γραμμικό πρόβλημα χαλάρωσης του ακέραιου προγραμματισμού**. Στην πραγματικότητα, ο χώρος των εφικτών λύσεων για ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού περικλείεται μέσα στο χώρο των εφικτών λύσεων του αντίστοιχου γραμμικού προβλήματος χαλάρωσης. Αυτό συνεπάγεται ότι η βέλτιστη τιμή για το γραμμικό πρόβλημα χαλάρωσης θα είναι μεγαλύτερη ή ίση της αντίστοιχης βέλτιστης τιμής για το πρόβλημα του ακέραιου προγραμματισμού.

Σε περιπτώσεις που οι μεταβλητές απόφασης ενός γραμμικού προβλήματος είναι φραγμένες, παίρνουν δηλαδή περιορισμένο αριθμό ακέραιων τιμών, οι ιδεώδεις μέθοδοι επίλυσης του είναι οι μέθοδοι κλάδου και φράγματος (branch and bound methods) οι οποίοι στηρίζονται σε μια έμμεση απαρίθμηση των δυνατών ακέραιων λύσεων που επιδέχεται το πρόβλημα.

Φυσικά, σήμερα υπάρχουν αρκετές μέθοδοι μικτού ακέραιου και ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Παρόλο όμως, που αρκετή ανθρώπινη προσπάθεια έχει αφιερωθεί με σκοπό να κατασκευαστούν αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για τη λύση των προβλημάτων αυτών, εν τούτοις δε μπορεί να πει κανείς ότι κάθε πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού έχει βρει τη λύση του. Πάντως, ενδιαφέρον είναι το γεγονός, ότι τα προβλήματα του ακέραιου προγραμματισμού που παρουσιάζονται σαν συνέπεια ενός πραγματικού προβλήματος, σχεδόν πάντα λύνονται.

Είναι γεγονός πάντως, ότι σε προβλήματα όπου οι μεταβλητές ξεπερνούν τις 100, το μέγεθος του προβλήματος ξεπερνά συνήθως τα όρια και η πιθανότητα να το λύσει κανείς σε ένα λογικό χρόνο στον υπολογιστή είναι πολύ μικρή.

Στον μικτό ακέραιο προγραμματισμό (mixed integer programming), οι μεταβλητές ενός γνήσιου μη κενού υποσυνόλου του συνόλου των μεταβλητών παίρνουν ακέραιες τιμές και οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι συνεχείς. Διακρίνουμε τις περιπτώσεις του μικτού ακέραιου προγραμματισμού και του μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού.

Πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού αποτελεί και το πρόβλημα που θα μας απασχολήσει στο κεφάλαιο 6.

3. Microsoft Solver Foundation

3.1 Τί είναι το Microsoft Solver Foundation

Το Microsoft Solver Foundation (εν συντομία, MSF) αποτελεί ένα σύστημα, βασισμένο στο περιβάλλον εργασίας .NET (.NET framework), σχεδιασμένο να αποτελέσει μια πλατφόρμα επιχειρησιακού σχεδιασμού και βελτιστοποίησής του. Το MSF περιλαμβάνει έναν αριθμό υπομονάδων, ώστε να συνεισφέρει προς αυτή την κατεύθυνση:

- Solvers (LP, MIP, CSP)
- OML (Optimization Modeling Language): μια γλώσσα μοντελοποίησης βασισμένη σε εξισώσεις
- APIs (Application Programming Interface): διεπαφή προγραμματιστικών διαδικασιών που επιτρέπει τη διασύνδεση με τις υπηρεσίες του MSF
- Δυνατότητα προσθήκης επιπρόσθετων solver
- Ένα πλαίσιο εργασίας βασισμένο στο Excel προς ανάπτυξη και επίλυση μοντέλων OML

Στα προσεχή κεφάλαια θα επικεντρωθούμε στη γλώσσα μοντελοποίησης OML και τη χρήση του MSF στο Excel μέσω του προσθέτου που σχεδιάστηκε για αυτό.

3.2 Γιατί να χρησιμοποιήσω το MSF Excel Add-in

Το συγκεκριμένο πρόσθετο του MSF εκμεταλλεύεται την εξοικείωση ενός χρήστη με το Excel και σε συνδυασμό με μια απλή σχετικά γλώσσα μοντελοποίησης υψηλού επιπέδου, κάνει πιο προσιτή και θελκτική τη συγκεκριμένη τεχνική επίλυσης ενός προβλήματος.

3.2.1 Excel Solver vs. Microsoft Solver Foundation

Ο Solver του Excel χρησιμοποιεί κελιά και αναφορές σε κελιά (references) για να τυποποιήσει και να υλοποιήσει μοντέλα βελτιστοποίησης, πράγμα με το οποίο είναι εξοικειωμένοι οι χρήστες του Excel, ούτως ώστε να μπορούν να κατασκευάσουν ένα μοντέλο, χωρίς να χρειάζεται να μάθουν πολλά περαιτέρω. Η άμεση εφαρμογή ενός μοντέλου στο Excel έχει επίσης πολλαπλά οφέλη, όπως η διαθεσιμότητα εργαλείων για επεξεργασία δεδομένων και εξαγωγής αποτελεσμάτων, καθώς και πλήθους ενσωματωμένων συναρτήσεων και δυναμικών γραφημάτων.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και σοβαρά μειονεκτήματα. Η μοντελοποίηση σ' ένα λογιστικό φύλλο είναι επιρρεπής σε λάθη, δυσχεραίνοντας έτσι την κατασκευή του. Επίσης το μοντέλο ελλείψει δομής και διαστατικότητας δυσκολεύει την απόδοση και παρουσίαση του προβλήματος σε τρίτους, ώστε να το κατανοήσουν ή να τροποποιήσουν στις ανάγκες τους. Το MSF Excel Add-in αντιμετωπίζει τις παραπάνω δυσκολίες, δίχως να χάνει τις διευκολύνσεις που παρέχονται απ' το Excel, με μόνο μελανό σημείο την ανάγκη εκμάθησης της OML σαν γλώσσα μοντελοποίησης.

3.2.2 OML vs. API

Ένα μοντέλο μπορεί να κατασκευαστεί με τη χρήση μιας γλώσσας μοντελοποίησης ή μιας κλασικής γλώσσας προγραμματισμού, όπως η C. Στη δεύτερη περίπτωση κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα API (Application Programming Interface) για να συνθέσει το μοντέλο. Αν και αυτός ο τρόπος μπορεί να δείχνει ελκυστικός, ιδιαίτερα σε όσους έχουν μια εμπειρία στον προγραμματισμό, αυτό δε σημαίνει ότι είναι προτιμότερος από άποψη παραγωγικότητας, απόδοσης, ποιότητας και συντήρησης του μοντέλου, ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων κι όχι πολύ καλά δομημένων μοντέλων.

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου σε μια γλώσσα μοντελοποίησης είναι πολύ περισσότερο αποτελεσματική. Πρώτα απ' όλα, το μοντέλο είναι πιο συμπαγές. Το ίδιο μοντέλο σε μια γλώσσα προγραμματισμού απαιτεί πολύ περισσότερες γραμμές κώδικα. Επιπλέον παρατηρείται πολλές φορές μια προσπάθεια αντιμετώπισης προβλημάτων, όπως η διαχείριση της μνήμης, που δε προκύπτουν σε μια γλώσσα μοντελοποίησης. Το όφελος στην παραγωγικότητα μπορεί να αποδοθεί στην περαιτέρω βελτίωση της τυποποίησης του μοντέλου.

Μεγάλα και πολύπλοκα μοντέλα απαιτούν πολλές αναθεωρήσεις και πειραματισμούς προκειμένου να επιτύχουν βέλτιστη απόδοση. Διαφορετικές τυποποιήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλες διαφορές στην απόδοση, έτσι είναι ωφέλιμο να είμαστε σε θέση να δοκιμάζουμε τις διάφορες τυποποιήσεις σύντομα, κάτι στο οποίο μια γλώσσα μοντελοποίησης ξεχωρίζει έναντι σε μια παραδοσιακή γλώσσα προγραμματισμού.

Οι πιο γνωστές γλώσσες μοντελοποίησης είναι οι GAMS και η AMPL. Και οι δύο αποτελούν πολύπλοκα συστήματα κι απαιτούν ιδιαίτερη προσπάθεια προκειμένου να αποκτήσει κάποιος άνεση στη χρήση τους. Η OML είναι μια πολύ απλούστερη γλώσσα. Μεγάλο μέρος της πολυπλοκότητας ενός μοντέλου (όπως η διαχείριση των δεδομένων μας) απομακρύνεται από τη γλώσσα μοντελοποίησης σε ένα περιβάλλον από την οποία καλείται. Αυτό μπορεί να είναι ένα πρόγραμμα σε C# ή στην περίπτωσή μας το Excel. Η προσέγγιση αυτή όμως, ενώ παράγει ένα απλούστερο και καθαρότερο μοντέλο, απαιτεί μια λεπτομερή προετοιμασία των δεδομένων προκειμένου να εισαχθούν σε αυτό.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, θα επικεντρωθούμε στην OML, όπως αυτή χρησιμοποιείται στο πρόσθετο για το Excel. Ο συνδυασμός αυτός μας δίνει ένα πλούσιο, μη δομημένο, περιβάλλον διαχείρισης και εξαγωγής δεδομένων, μια μικρή, περιορισμένη γλώσσα μοντελοποίησης, μια ενσωματωμένη γλώσσα δέσμης ενεργειών (VBA – Visual Basic for Applications) κι αρκετά εργαλεία, όπως κουμπιά προς δημιουργία μικρών εφαρμογών. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα θα γίνουν πιο εμφανή στο κεφάλαιο 6.

4. OML – Η γλώσσα

Η OML (Optimization Modeling Language) είναι η γλώσσα μοντελοποίησης του Microsoft Solver Foundation. Η βασική δομή ενός μοντέλου OML είναι η εξής:

```
Model[
    Parameters[...],
    Decisions[...],
    Goals[{Minimize|Maximize}[...]],
    Constraints[...]
]
```

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας τομέας στις Decisions (Αποφάσεις), ενώ τα υπόλοιπα είναι προαιρετικά. Μπορεί να υπάρχουν πολλαπλοί τομείς σε κάθε τύπο. Οι στόχοι μας καθορίζονται στον τομέα Goals και μπορεί να αποτελούν αντικείμενα μεγιστοποίησης (maximize) ή ελαχιστοποίησης (minimize). Αν τεθούν πολλαπλοί στόχοι, αυτοί επεξεργάζονται με τη σειρά. Όταν βρεθεί η βέλτιστη τιμή ενός στόχου, η τιμή αυτή «παγώνει», όσο αναλύονται οι επόμενοι στόχοι. Είναι πιθανό να μην καθορίσουμε κάποιο στόχο, το οποίο καταλήγει στην εύρεση μιας εφικτής λύσης για την/τις αποφάσεις. Να σημειώσουμε ότι η OML είναι case-sensitive (ευαισθησία πεζών-κεφαλαίων), π.χ. «Model» και «model» δεν είναι το ίδιο.

4.1 Parameters (Παράμετροι)

Ο τομέας των παραμέτρων (Parameters) εμπεριέχει τα ορίσματα (Sets) και τις παραμέτρους (Parameters). Εμείς θα επικεντρωθούμε στο τρόπο που δηλώνονται τα παραπάνω. Τα δεδομένα που αντιστοιχίζονται σ' αυτά διαβάζονται από ένα υπολογιστικό φύλλο (spreadsheet), όπως θα δούμε και στα προσεχή κεφάλαια.

4.1.1 Sets (Σύνολα)

Τα Sets μπορούν να δηλωθούν στην OML, το περιεχόμενό τους όμως προέρχεται εξ' ολοκλήρου από το Excel μέσω αντιστοίχισης. 'Ενα Set δηλώνεται ως εξής:

```
Parameters[Sets,I,J]
```

Εδώ έχουμε 2 Set τα στοιχεία των οποίων θα προέλθουν από το φύλλο Excel. Η παραπάνω δήλωση μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη για τα I και J αντίστοιχα:

```
Parameters[Sets,I],Parameters[Sets,J]
```

Πολλές φορές απαιτείται να εκτελέσουμε πράξεις σε στοιχεία των Sets. Μπορούμε π.χ. να περιορίσουμε τις τιμές των Sets σε ακέραιους (Integers) ως εξής:

```
Parameters[Sets[Integers],I,J]
```

4.1.2 Scalars (Βαθμωτά μεγέθη)

Ένα βαθμωτό μέγεθος μπορεί να δηλωθεί ως εξής:

Parameters[Reals,a=10]

Είναι δυνατόν να προσθέσουμε περιορισμούς σ' ένα πεδίο ορισμού. Π.χ. το

Parameters[Reals[0,100],a=110]

θα μας δώσει σφάλμα καθώς για την τιμή 110 δεν ισχύει $0 < a < 100$. Το ίδιο σφάλμα προκύπτει και για το παρακάτω:

Parameters[Integers,a=0.5]

καθώς η τιμή 0,5 δεν ανήκει στους ακέραιους.
Οι κλασματικές τιμές μπορούν να δηλωθούν είτε ως

Parameters[Reals,a=0.5] ή
Parameters[Reals,a=1/2]

4.1.2.1 Περιορισμοί

Τα βαθμωτά μεγέθη δε μπορούν να διαβαστούν από ένα φύλλο εργασίας με το παραπάνω συντακτικό. Για να γίνει αυτό πρέπει να δηλωθούν ως εξής:
Parameters[Integer,N[]]

Επίσης δυστυχώς δε μπορούμε να ορίσουμε μια σχέση σ' ένα μέγεθος, όπως

Parameters[Integers,N1=N+1]
Parameters[Integers[0,N],M]

τα όρια της οποίας πρέπει να είναι αριθμοί. Η τιμή του N1 μπορεί παρ' όλα αυτά να εισαχθεί από το φύλλο εργασίας, όπου θα υπολογίζεται σε κάποιο κελί.

4.1.3 Πίνακες και Ανύσματα

Οι πίνακες και τα ανύσματα πρέπει να εισαχθούν στο μοντέλο από το φύλλο εργασίας. Οι τιμές τους δε μπορούν να δηλωθούν απ' ευθείας στην OML.

Parameters[Sets,I,J],
Parameters[Reals,v[I],A[I,J]]

Το πεδίο ορισμού μπορεί να περιοριστεί αν χρειαστεί:

Parameters[Integers[1,5],w[I]]

όπου οι τιμές του που αντιστοιχίζονται στο άνυσμα w[I] μπορεί να είναι μόνο ακέραιοι μεταξύ 1 και 5. Από το παραπάνω σε αντίθετη περίπτωση θα προκύψει σφάλμα και το μοντέλο δε θα επιλυθεί. Να σημειώσουμε ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα –Infinity και Infinity σαν περιορισμούς.

4.1.3.1 Περιορισμοί

Δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια παράμετρο για να ορίσουμε ένα όριο. Π.χ.

Parameters[Integers,N=10],
Parameters[Reals[0,N],v[I],A[I,J]]

4.2 Αποφάσεις (Decisions)

Στο τμήμα των αποφάσεων (Decisions) δηλώνονται οι μεταβλητές. Επίσης καθορίζονται τα όρια των μεταβλητών κι ο τύπος τους. Π.χ.

Decisions[Reals,x] (Μια ελεύθερη βαθμωτή μεταβλητή)
Decisions[Reals[0,Infinity],y[I,J]] (Πίνακας θετικών μεταβλητών)

Αν δε δηλώσουμε όρια η OML θα υποθέσει ότι οι μεταβλητές είναι ελεύθερες, όπως συμβαίνει και στο GAMS, όχι όμως και στην πλειονότητα των συστημάτων μοντελοποίησης, που υποθέτουν θετικές μεταβλητές σαν προεπιλογή.

4.2.1 Πεδία ορισμού (Domains)

Έχουμε τα ακόλουθα πεδία ορισμού:

- Πραγματικοί αριθμοί (Reals): για συνεχείς μεταβλητές
- Ακέραιοι (Integers): για ακέραιες και δυαδικές μεταβλητές. Στην περίπτωση δυαδικών ή 0-1 μεταβλητών θέτουμε σαν κατώτατο όριο το 0 και ανώτατο το 1, δηλ.

  Decisions[Integers[0,1],x[I,J]]

- Λογικές: οι τιμές των μεταβλητών αυτών μπορεί να είναι αληθής (True) ή ψευδής (False). Οι μεταβλητές αυτές δε πρέπει να συγχέονται με τις δυαδικές. Σε πολλές περιπτώσεις προτιμούμε τις δυαδικές καθώς επιτρέπουν τη χρήση τους σε αριθμητικές πράξεις σε εξισώσεις.

4.2.2 Foreach

Η δομή Foreach (για κάθε) έχει έναν αριθμό τύπων:

- Foreach[{i,N},…] για i=0,1,..N-1. (Η επανάληψη έχει σαν βάση το 0)
- Foreach[{j,k,N},…] για j=k,k+1,..,N-1. (και πάλι δε συμπεριλαμβάνεται το N)
- Foreach[{i,I},…] η επανάληψη του οποίου ορίζεται από το Set I.

Να σημειώσουμε ότι οι εκφράσεις Foreach[{i,N},…] και Foreach[{i,0,N},…] είναι ταυτόσημες.

Η δομή Foreach μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δηλώσει μεταβλητές σε πίνακα μία-μία:

```
Parameters[Integers,N=10],
Decisions[Reals, Foreach[{i,N},x[i]]]
```

4.2.3 FilteredForeach

Η δομή FilteredForeach αποτελεί επέκταση της Foreach. Προσθέτει μια συνθήκη επί της οποίας γίνεται η επανάληψη, π.χ.

FilteredForeach[{i,N},i!=3,…] που ισχύει για i=0,1,2,4,5,…,N-1

Γενικά τα μοντέλα OML δείχνουν καλύτερα όταν χρησιμοποιούμε το 0 σαν πρώτο στοιχείο της επανάληψης. Η δομή FilteredForeach δεν επιτρέπει μια συνθήκη να εξαρτάται από μια μεταβλητή. Αν ένας περιορισμός εξαρτάται από μια μεταβλητή, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε τη δομή Implies[], όπως θα δούμε και παρακάτω.

4.3 Περιορισμοί (Constraints)

Οι περιορισμοί είναι εξισώσεις (ισότητες/ανισότητες) που προσθέτουν επιπλέον συνθήκες στη λύση. Για μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού ή μικτού-ακέραιου προγραμματισμού όλοι οι περιορισμοί πρέπει να είναι γραμμικοί.

4.3.1 Σύνολα (Summations)

Η έκφραση Sum αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στη μοντελοποίηση. Τα σύνολα που αναφέρονται σε Sets είναι κάτι συνηθισμένο, π.χ. Sum[{i,I},…]. Παρομοίως χρησιμοποιείται και για 2 Sets που αντιστοιχούν σε δυσδιάστατο πίνακα: Sum[{i,I},{j,J},…].

Η άθροιση ακέραιων λειτουργεί παρόμοια με τη δομή Foreach, δηλ. η Sum[{i,N},…] αθροίζει για i=0,1,…,N-1. Προσθέτοντας κατώτατο όριο έχουμε Sum[{j,k,N},…] που αθροίζει για j=k,k+1,…,N-1. Αυτό σημαίνει ότι Sum[{k,1,3},1] = 2 (για k από 1 έως 3-1=2 (2 επαναλήψεις), δηλ. 2 αθροίσεις του 1 (1+1=2)).

Επιπρόσθετα υπάρχει μια μεταβλητή FilteredSum[], που μπορεί να προσθέτει μια συνθήκη στην άθροιση. Π.χ. FilteredSum[{k,1,4},k!=2,k] = 4 (1+3=4). Η δομή FilteredSum[] δεν επιτρέπει η συνθήκη να εξαρτάται από κάποια μεταβλητή. Σε μια τέτοια περίπτωση χρησιμοποιούμε ένα τυπικό Sum μ' ένα παράγοντα AsInt[συνθήκη].

4.3.2 Διαφορετικοί περιορισμοί

Σε μερικά προβλήματα περιορισμού, μπορεί να προκύψει η ακόλουθη συνθήκη:

X[i] = k, όπου *k* διαφορετικό για κάθε *i*

Αυτό αποτελεί κάτι δύσκολο να μοντελοποιηθεί, αλλά μπορεί να εκφραστεί εύκολα χρησιμοποιώντας τη δομή Unequal. Η παραπάνω συνθήκη γίνεται:

Unequal[Foreach[{i,N},x[i]]]

4.3.3 Implies (Προϋπόθεση)

Η δομή "αν (συνθήκη) τότε περιορισμός" ("if (condition" then constraint") τυποποιείται χρησιμοποιώντας τη δομή Implies:

Implies[x==1,y<=10],

η οποία είναι διαθέσιμη μόνο σε CSP μοντέλα.

4.3.4 ΚΑΙ/'Η (AND/OR)

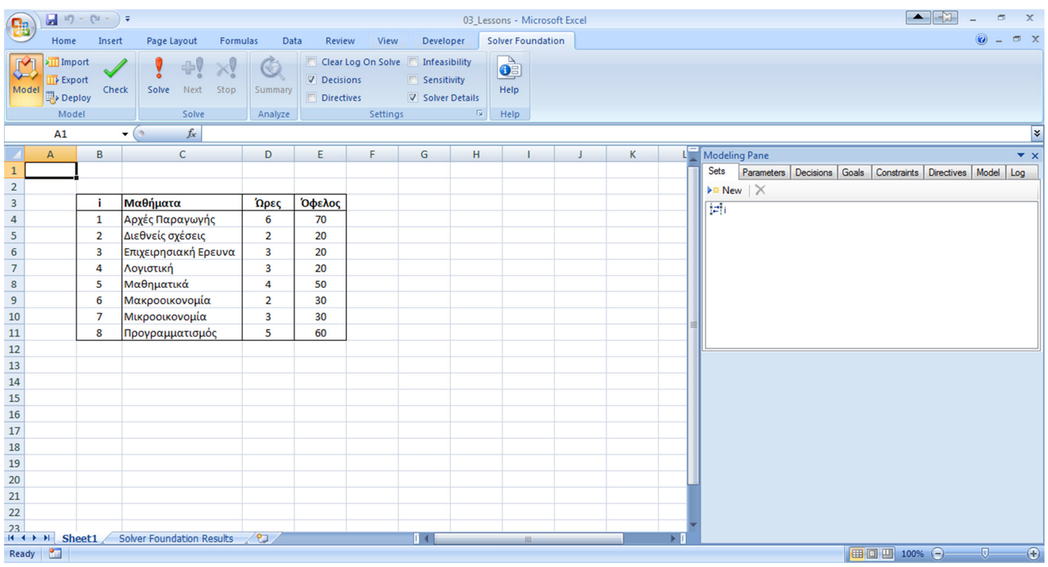
Σε CSP μοντέλα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις δομές And[exp1,exp2,…] και Or[exp1,exp2,…]. Μπορούν επίσης να γραφούν και με τη χρήση συμβόλων ως εξής: exp1 & exp2 και exp1 | exp2 αντίστοιχα για τα And και Or.

5. Microsoft Solver Foundation for Excel add-in

5.1 Εισαγωγή

Το πρόσθετο του MSF για το Excel κάνει ευκολότερη την κατασκευή και επίλυση μοντέλων. Μπορούμε να καθορίσουμε ένα μοντέλο εισάγοντας δεδομένα εισόδου και εξόδου, στόχων και περιορισμών στο παράθυρο μοντελοποίησης, με τη βοήθεια της OML. Επίσης μπορούμε να συσχετίσουμε τα δεδομένα εισόδου και εξόδου με σειρές κελιών σ' ένα ή περισσότερα φύλλα εργασίας, να εξάγουμε χρήσιμες αναφορές αποτελεσμάτων και να καθορίσουμε τη συμπεριφορά του αντίστοιχου solver.

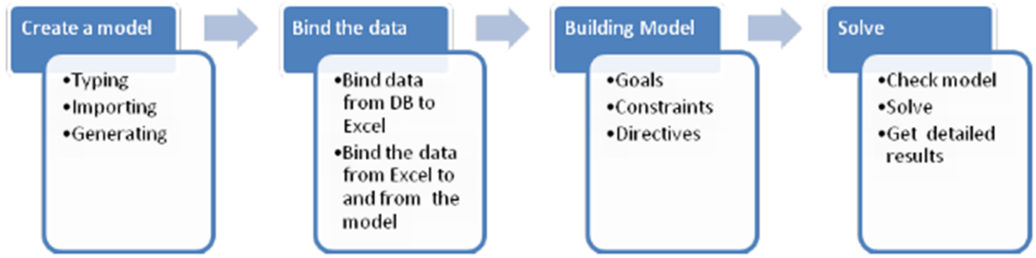
Θα χρησιμοποιήσουμε ένα απλό παράδειγμα από τις σημειώσεις του μαθήματος «Επιχειρησιακή Έρευνα» σαν μια εισαγωγή στη χρήση του προσθέτου. Εργαζόμαστε στο Excel 2007 κι η έκδοση του πρόσθετου είναι η Express 3.1 που διατίθεται δωρεάν. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, επιθυμούμε να αποκομίσουμε το μέγιστο όφελος στον διαθέσιμο χρόνο. Μια πρώτη όψη του συγκεκριμένου φύλλου εργασίας έχει ως εξής:



Εικόνα 5.1: Η καρτέλα στην κορδέλα του Excel και το παράθυρο μοντελοποίησης

Τα μοντέλα κατασκευάζονται στο παράθυρο που βλέπουμε στο δεξί μέρος, όπου εισάγουμε τα δεδομένα μας (parameters), τις αποφάσεις (decisions), τους στόχους υπό μορφή αντικειμενικών συναρτήσεων (goals), τους περιορισμούς (constraints) και τα ορίσματα (sets). Οι περιορισμοί και οι στόχοι καθορίζονται με χρήση της OML. Ακόμη μπορούμε να συνδέσουμε δεδομένα εισόδου και εξόδου με διάφορα κελιά στο φύλλο εργασίας (data binding). Η κορδέλα (ribbon) του MSF παρέχει εντολές επίλυσης και παραμετροποίησης του μοντέλου που κατασκευάζουμε.

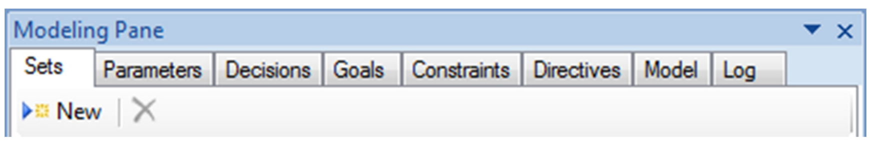
Η διαδικασία που ακολουθούμε στο χτίσιμο και επίλυση ενός μοντέλου συχνά διαφοροποιείται. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει μια τυπική ροή εργασίας. Η κατασκευή του μοντέλου γίνεται κυρίως στο παράθυρο μοντελοποίησης, ενώ η επίλυση και εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας τις εντολές της κορδέλας.



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα ροής εργασίας

5.2 Κατασκευάζοντας ένα μοντέλο

Το παράθυρο μοντελοποίησης παρέχει ένα σύνολο καρτελών όπου εμπεριέχονται οι πληροφορίες του μοντέλου που συσχετίζεται με το αντίστοιχο βιβλίο εργασίας (workbook) του Excel.



Εικόνα 5.3: Οι καρτέλες του παράθυρου μοντελοποίησης

Sets (Σύνολα) – Είναι μια συλλογή αντικειμένων που χρησιμοποιούνται σαν δείκτες παραμέτρων (Parameters) ή αποφάσεων (Decisions). Για παράδειγμα, μια παράμετρος που είναι πίνακας δύο διαστάσεων επιδέχεται δύο Sets σαν δείκτες.
Parameters (Παράμετροι) – Αποτελούν τα δεδομένα εισαγωγής (inputs) στον solver. Οι παράμετροι μπορεί να είναι μια σειρά δεδομένων ή να έχουν μια σταθερή τιμή του τύπου Reals (πραγματικοί), Integers (ακέραιοι) ή Booleans (λογικοί).
Decisions (Αποφάσεις) – Αποτελούν τα δεδομένα εξαγωγής (outputs) ή αποτελέσματα του μοντέλου που επιλύεται. Οι υποστηριζόμενοι τύποι είναι ίδιοι με αυτούς των παραμέτρων (Reals, Integers, Booleans).
Goals (Στόχοι) – Εδώ τίθεται ο στόχος ή στόχοι που προσπαθούμε να επιτύχουμε. Χρησιμοποιούνται ώστε να καθοριστεί μια ποσότητα ή εξίσωση που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε ή να μεγιστοποιήσουμε.
Constraints (Περιορισμοί) – Εδώ προστίθενται οι περιορισμοί του μοντέλου που αφορούν τις αποφάσεις (Decisions).
Directives (Οδηγίες) – Παρέχουν τη δυνατότητα να κατευθύνουμε τον solver προς μια κατεύθυνση μη προεπιλεγμένη ανάλογα με τη φύση του εκάστοτε προβλήματος.
Model (Μοντέλο) – Εδώ βλέπουμε το μοντέλο σε μορφή OML. Οι προχωρημένοι χρήστες μπορούν να επεξεργάζονται το μοντέλο απευθείας από τη συγκεκριμένη καρτέλα.
Log – Εδώ παρέχονται οι λεπτομέρειες των δεδομένων εξαγωγής.

5.2.1 Δεδομένα εισόδου και εξόδου (Inputs and Outputs)

Τα περισσότερα μοντέλα έχουν ένα αλγεβρικό τύπο, αλλά εξαρτώνται από τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για το εκάστοτε πρόβλημα. Δεδομένα μπορούν να εισαχθούν χειροκίνητα ή αυτόματα από άλλες πηγές χρησιμοποιώντας τα κουμπιά της πρώτης ομάδας της καρτέλας «Δεδομένα» (“Data”) στην κορδέλα (ribbon). Στο παράδειγμά μας εισαγάγαμε τα δεδομένα μας χειροκίνητα ως εξής:

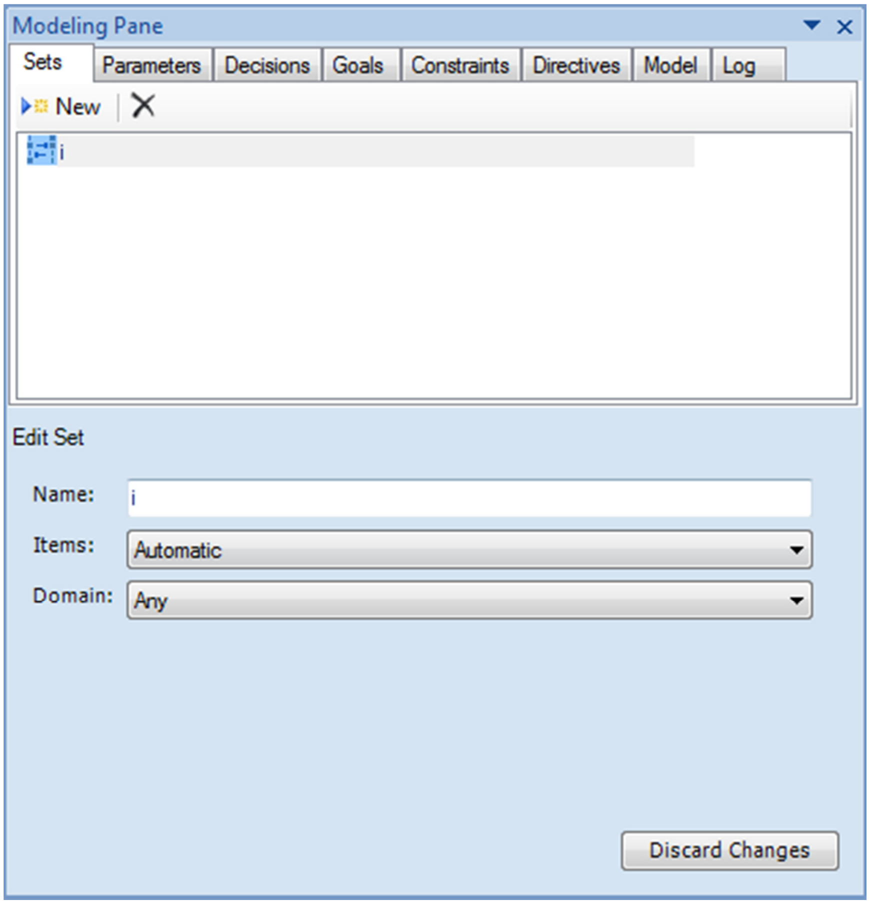
i	Μαθήματα	Ώρες	Όφελος
1	Αρχές Παραγωγής	6	70
2	Διεθνείς σχέσεις	2	20
3	Επιχειρησιακή Ερευνα	3	20
4	Λογιστική	3	20
5	Μαθηματικά	4	50
6	Μακροοικονομία	2	30
7	Μικροοικονομία	3	30
8	Προγραμματισμός	5	60

Εικόνα 5.4: Τα δεδομένα του προβλήματος

Αφού το φύλλο εργασίας περιέχει δεδομένα για το μοντέλο μας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις καρτέλες Sets, Parameters και Decisions στο παράθυρο μοντελοποίησης για να συνδέσουμε τα δεδομένα προς και από το μοντέλο.

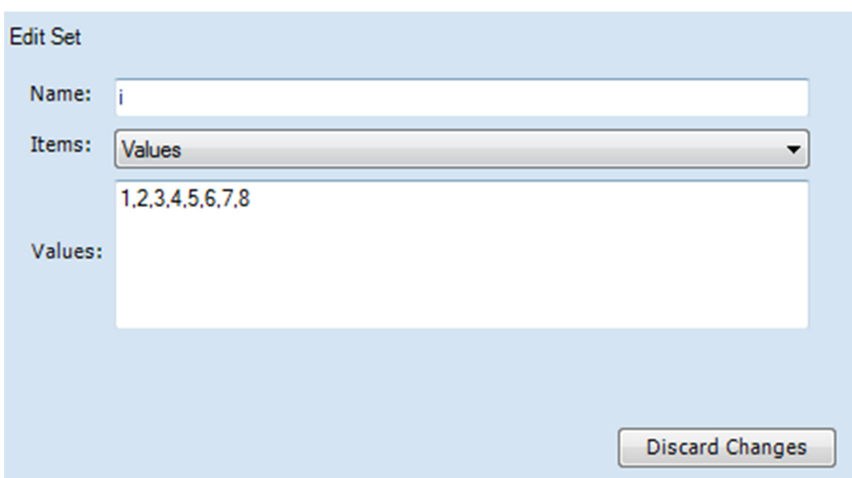
5.2.1.1 Sets

Ένα Set αποτελεί μια μη ταξινομημένη λίστα αντικειμένων που καθορίζουν το σύνολο των δεικτών μιας παραμέτρου ή απόφασης. Το παράθυρο των Sets παρέχει πεδία για το όνομά τους, για τον τρόπο που ορίζονται και το πεδίο ορισμού τους. Ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται γίνεται συνήθως αυτόματα βάση των παραμέτρων ή αποφάσεων που αυτά ορίζουν. Στο παράδειγμά μας το Set “i” καθορίζεται από τις παραμέτρους «Ώρες» και «Όφελος», όπως θα δούμε και παρακάτω.



Εικόνα 5.5: Η καρτέλα Sets

Ένας άλλος τρόπος για να καθορίσουμε το πεδίο "Items" είναι επιλέγοντας "Values" και εισάγοντας τις τιμές που θα πάρει το συγκεκριμένο Set μία-μία:



Εικόνα 5.6: Εισάγοντας απ' ευθείας τις τιμές ενός set

Η επιλογή "Automatic" είναι συνήθως η προτιμότερη από πρακτική και μόνο σκοπιά, καθώς το να γράφουμε μία-μία τις τιμές δεν είναι καθόλου βολικό.

Το πεδίο ορισμού για ένα Set για τα περισσότερα μοντέλα δεν είναι σημαντικό, οπότε αφήνουμε την προεπιλεγμένη επιλογή "Any". Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου τα Sets χρησιμοποιούνται στις εκφράσεις των στόχων (Goals) ή των περιορισμών (Constraints) μπορεί να θελήσουμε να αλλάξουμε το πεδίο ορισμού σε "Reals" ή "Integers". Όπως και να 'χει, το πεδίο ορισμού των Sets θα ελεγχθεί για την εγκυρότητά του, όταν προσπαθήσουμε να επιλύσουμε το μοντέλο. Αν επιλέξουμε "Values" στο πεδίο "Items", πεδίο ορισμού θεωρείται αυτό των πραγματικών αριθμών (Reals).

5.2.1.2 Parameters

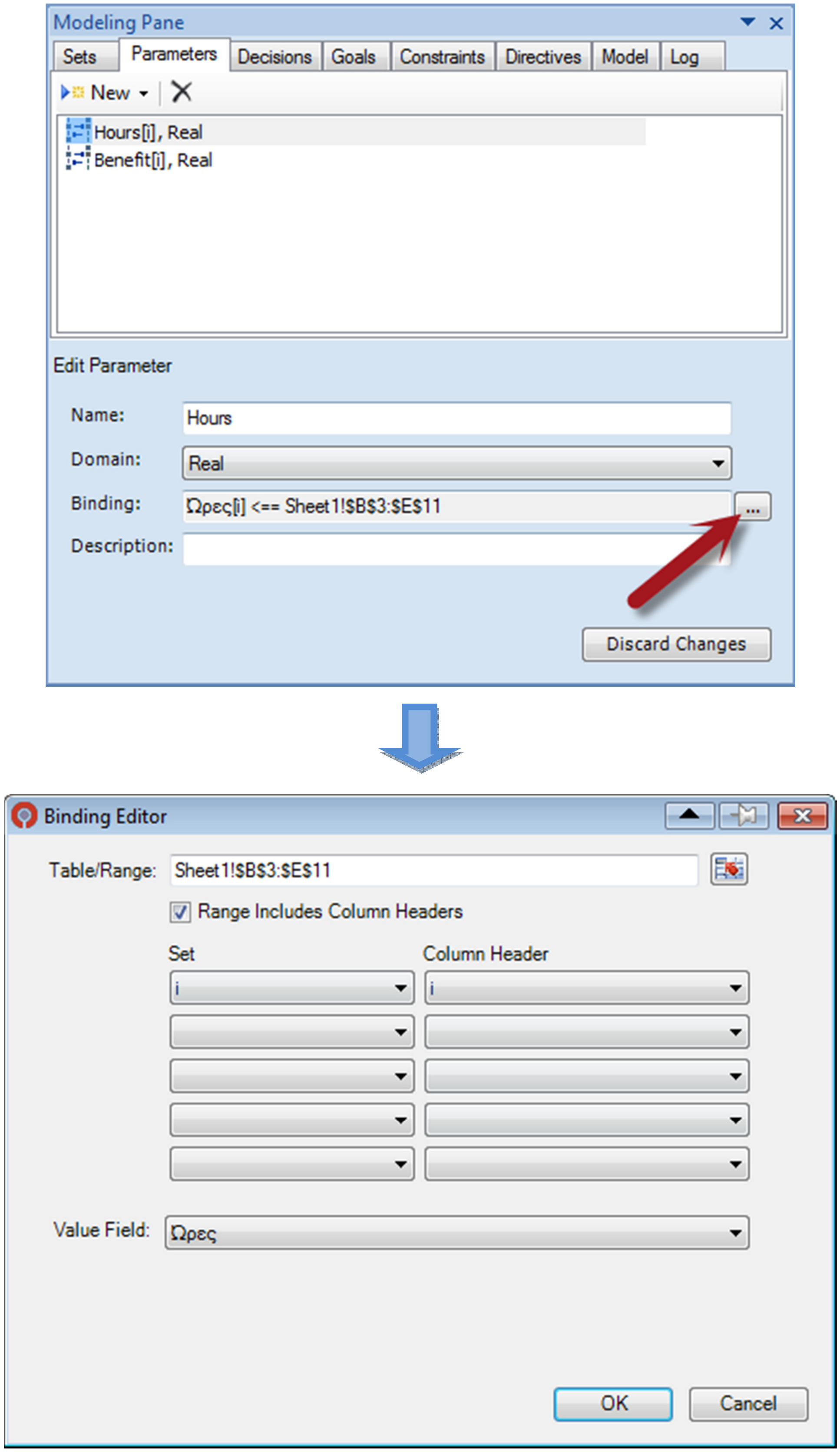
Η καρτέλα των παραμέτρων (Parameters) μας επιτρέπει να συσχετίσουμε δεδομένα από το φύλλο Excel στο μοντέλο μας. Οι τύποι των παραμέτρων που μας είναι διαθέσιμοι είναι οι εξής:

Parameter (Παράμετρος) – Αντιπροσωπεύουν πραγματικές ή ακέραιες τιμές σε μια περιοχή.

Random Parameter (Τυχαία παράμετρος) – Χρησιμοποιούνται σε στοχαστικά μοντέλα κι αντιπροσωπεύουν μια τυχαία κατανομή. Οι τυχαίες παράμετροι διαιρούνται σε:

- **Scenario Parameter (Παράμετρος σεναρίου)** – Μια τυχαία παράμετρος όπου οι πιθανές τιμές καθορίζονται από σενάρια. Κάθε σενάριο έχει μια συσχετισμένη τιμή και πιθανότητα να προκύψει.
- **Distribution Parameter (Παράμετρος κατανομής)** – Μια τυχαία παράμετρος που αντιπροσωπεύει μια διακριτή ή συνεχή τυχαία κατανομή.

Οι παράμετροι μπορεί να έχουν μοναδικές τιμές ή να αποτελούν πίνακες με τη χρήση δεικτών (Sets). Και οι δύο τύποι παραμέτρων (τυχαίες και μη τυχαίες) μπορεί να είναι υπό μορφή πίνακα. Για να συσχετίσουμε Sets με Parameters χρησιμοποιούμε τον "Binding Editor" κάνοντας κλικ στο αντίστοιχο πλήκτρο όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Στο παράδειγμά μας οι δύο παράμετροι είναι οι «Ώρες» και το «Όφελος», που αντιστοιχούν στα "Hours" και "Benefit". Τα δεδομένα μας εμπεριέχονται στον πίνακα "DATA".



Εικόνα 5.7: Καλώντας τον "Binding Editor"

Στον “Binding Editor” θέτουμε την περιοχή που περιέχει τα δεδομένα μας χρησιμοποιώντας το πλήκτρο  στο πάνω-δεξιά μέρος του παραθύρου. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε το όνομα μιας περιοχής, π.χ. αντί να δηλώσουμε την περιοχή με τη χρήση του παραπάνω πλήκτρου, να γράψουμε “Sheet1!DATA[#All]” (αντί δηλαδή του “Sheet1!$B$3:$E$11”). Ο “Binding Editor” υποστηρίζει τρεις διαφορετικές διατάξεις δεδομένων:

- Μονή σειρά ή στήλη – Στη περίπτωση αυτή θα πρέπει η επιλογή “Range Includes Column Headers” («Η Περιοχή Συμπεριλαμβάνει Επικεφαλίδες Στήλης») να μην είναι σημειωμένη οπότε δηλώνουμε την περιοχή που περιέχει τις τιμές δίχως τις επικεφαλίδες. Στην πρώτη αναπτυσσόμενη λίστα (dropdown list) για τα Set επιλέγουμε αυτό που αντιπροσωπεύει τους δείκτες για τη συγκεκριμένη παράμετρο.

- Πίνακας που περιέχει μόνο τιμές – Και πάλι δεν επιλέγουμε το “Range Includes Column Headers” και δηλώνουμε την περιοχή. Στην πρώτη dropdown για τα Sets δηλώνουμε το Set που αντιστοιχεί στις σειρές (row) και στη δεύτερη dropdown στις στήλες (column).

- Πίνακας που περιέχει κεφαλίδες και τιμές – Στην περίπτωση αυτή ο πίνακας εμπεριέχει τις επικεφαλίδες που περιγράφουν τα περιεχόμενα κάθε στήλης, οπότε και δηλώνουμε αυτή τη φορά την επιλογή “Range Includes Column Headers”. Τυπικά μία ή περισσότερες στήλες περιέχουν τις τιμές των παραμέτρων και μία τις τιμές των Set. Για κάθε στήλη που περιέχει μια παράμετρο αντιστοιχίζουμε το Set με το οποίο συσχετίζεται στο πρώτο dropdown και δίπλα τον τίτλο του και στο “Value Field” την επικεφαλίδα που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη παράμετρο.

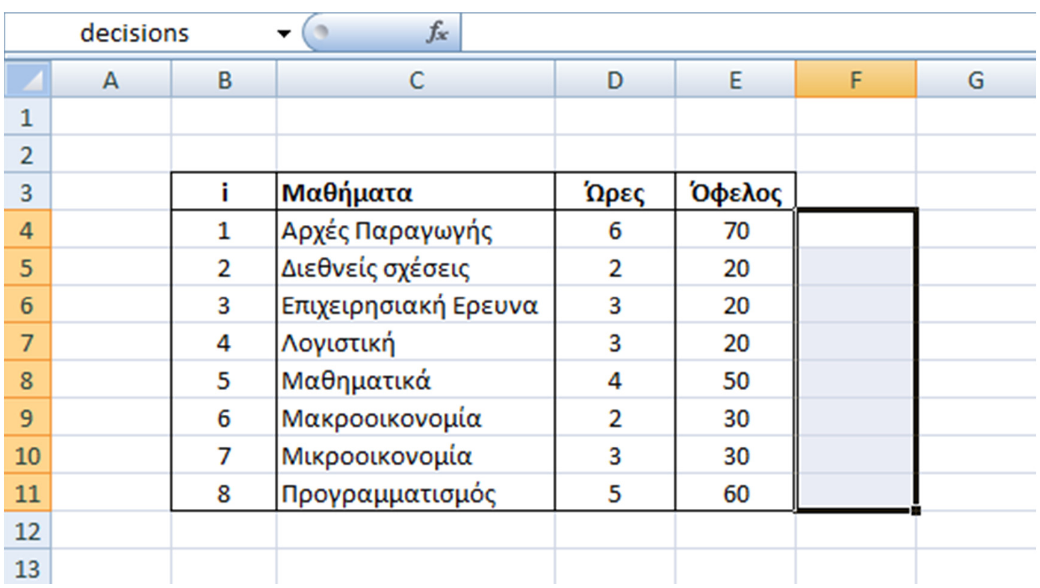
Το παράδειγμά μας αφορά την τρίτη περίπτωση, όπου βλέπουμε σημειωμένη την επιλογή “Range Includes Column Headers” και τα πεδία “Set”, “Column Header” και “Value Field” συμπληρωμένα ανάλογα. Να προσέξουμε ότι σε περίπτωση κενών κελιών σε μια σειρά ή πίνακα δεδομένων θα προκύψει σφάλμα κατά την επίλυση του μοντέλου.

5.2.1.3 Decisions

Παρομοίως με την καρτέλα των παραμέτρων, το παράθυρο των αποφάσεων (Decisions) επιτρέπει στο χρήστη να συνδέσει τις τιμές που θα προκύψουν γι' αυτές από την επίλυση του μοντέλου με κάποια συγκεκριμένα κελιά. Αυτό συνήθως δεν είναι απαραίτητο καθώς το MSF εξάγει τα αποτελέσματα για τις αποφάσεις στο φύλλο εργασίας που περιέχει τα συνολικά αποτελέσματα από την επίλυση του μοντέλου, αλλά γίνεται ώστε να έχουμε μια καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα δεδομένα μας. Υποστηρίζονται δύο τύποι αποφάσεων:

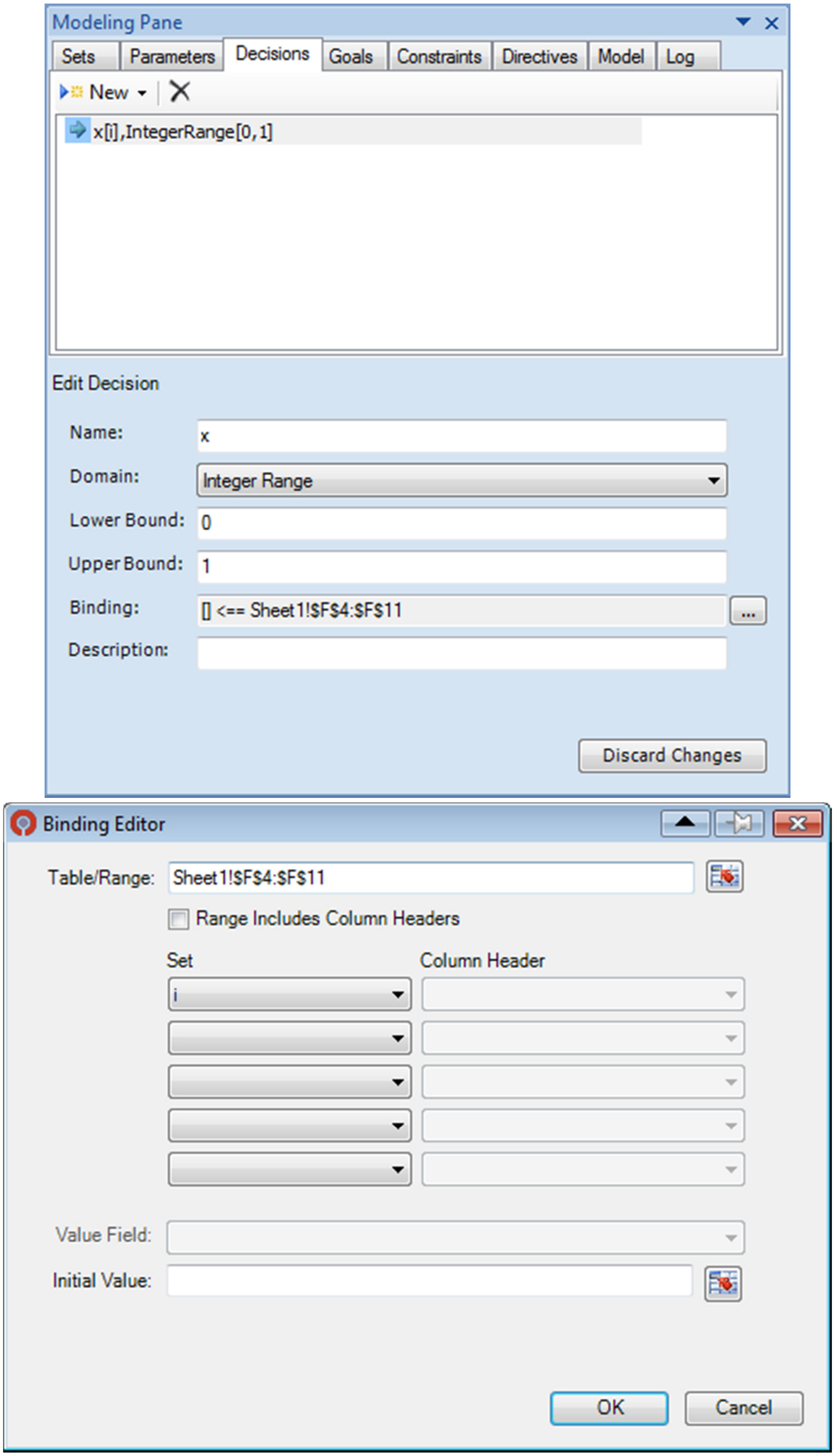
- **Decision** – Ένα δεδομένο εξόδου που αντιπροσωπεύει την τιμή που αποφασίζει ο solver.
- **Recourse Decision** – Ένα δεδομένο εξόδου ενός στοχαστικού μοντέλου που προκύπτει από τον καθορισμό μιας τυχαίας παραμέτρου.

Οι αποφάσεις, όπως κι οι παράμετροι, μπορούν να εξαχθούν υπό μορφή πίνακα χρησιμοποιώντας τα Sets. Το μοντέλο του παραδείγματός μας έχει μία απόφαση που παίρνει δύο τιμές. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2.1, είναι προτιμότερο να εκφραστεί σαν ακέραιος που παίρνει τις τιμές 0 και 1, που υποδηλώνει την επιλογή ή όχι του μαθήματος. Στη συνέχεια δηλώσαμε σαν «περιοχή εξόδου» την στήλη δεξιά των παραμέτρων, καθώς η απόφαση "x" είναι εκφρασμένη ως προς το Set "i", ώστε να είναι εμφανέστερη η αντιστοίχισή της με τα μαθήματα. Στην περίπτωσή μας στον Binding Editor έχουμε δηλώσει στην πρώτη σειρά των Sets το "i", αλλά αν αντιστοιχεί μια μοναδική τιμή σε κάποια απόφαση αφήνουμε όλα τα πεδία κενά, εκτός της περιοχής που δηλώνει το κελί εξόδου. Η περιοχή στο κάτω μέρος του Binding Editor, που αντιστοιχεί σε μια αρχική τιμή (Initial Value), μας επιτρέπει να εισάγουμε μια αρχική «μαντεψιά» για την τιμή της απόφασης κι είναι προαιρετικό.



i	Μαθήματα	Ώρες	Όφελος
1	Αρχές Παραγωγής	6	70
2	Διεθνείς σχέσεις	2	20
3	Επιχειρησιακή Ερευνα	3	20
4	Λογιστική	3	20
5	Μαθηματικά	4	50
6	Μακροοικονομία	2	30
7	Μικροοικονομία	3	30
8	Προγραμματισμός	5	60

Εικόνα 5.8: Η περιοχή εξαγωγής της απόφασης



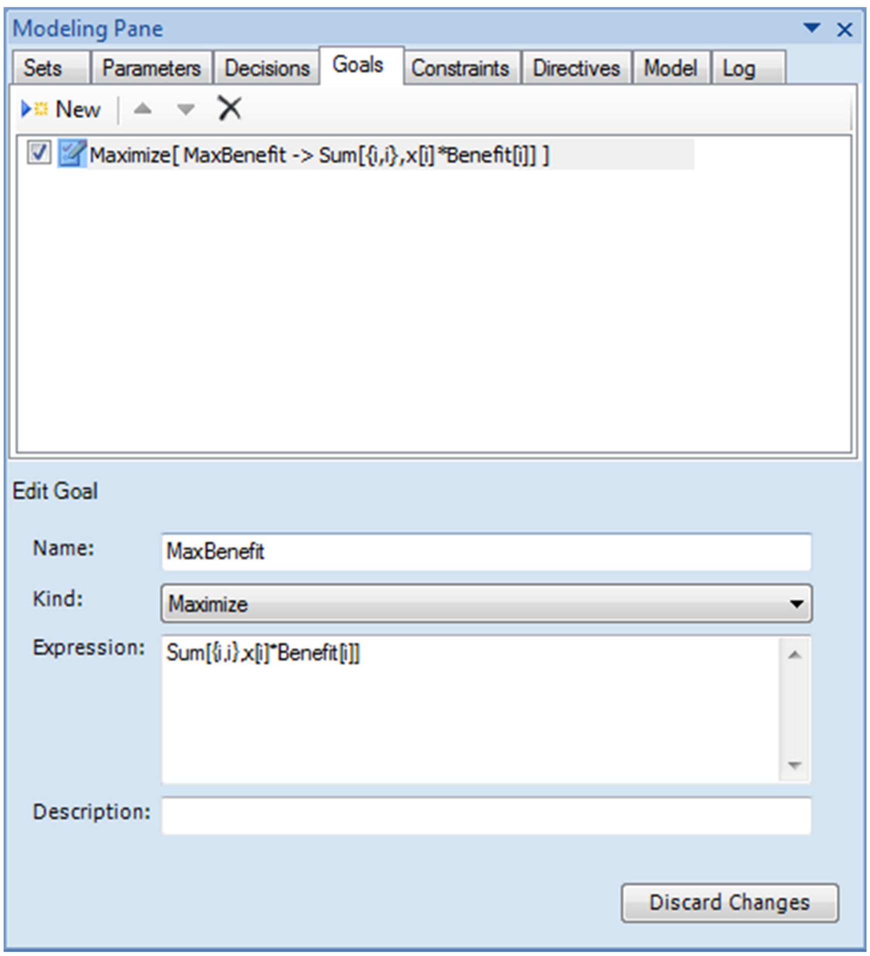
Εικόνα 5.9: Συνδέοντας την απόφαση

5.2.2 Στόχοι, Περιορισμοί και Οδηγίες

Οι παράμετροι και αποφάσεις είναι η πρώτη ύλη στη κατασκευή ενός μοντέλου χρησιμοποιώντας στόχους (goals), περιορισμούς (constraints) και οδηγίες (directives). Οι στόχοι κι οι περιορισμοί καθορίζονται αλγεβρικά με χρήση της OML. Η γλώσσα παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες που επιτρέπουν την επαρκή και κατανοητή διατύπωσή τους. Σε πολλές περιπτώσεις οι στόχοι κι οι περιορισμοί αναφέρονται παράλληλα σε πολλαπλές τιμές δεδομένων εισόδου και εξόδου. Εδώ φαίνεται η χρησιμότητα της κατηγοριοποίησης των δεδομένων μας και της χρήσης των Foreach και Sum, όπως θα γίνει κατανοητό και στο παράδειγμά μας.

5.2.2.1 Goals

Ένας στόχος συνδυάζει παραμέτρους και αποφάσεις με σκοπό να επιτύχει βελτιστοποίηση του μοντέλου. Τυπικά, εκφράζει επαγγελματικούς στόχους και προτιμήσεις, όπως η μεγιστοποίηση κέρδους/ελαχιστοποίηση κόστους ή η ελαχιστοποίηση χρόνου αναμονής. Στο παράδειγμά μας είναι το μέγιστο όφελος στο διαθέσιμο χρόνο:

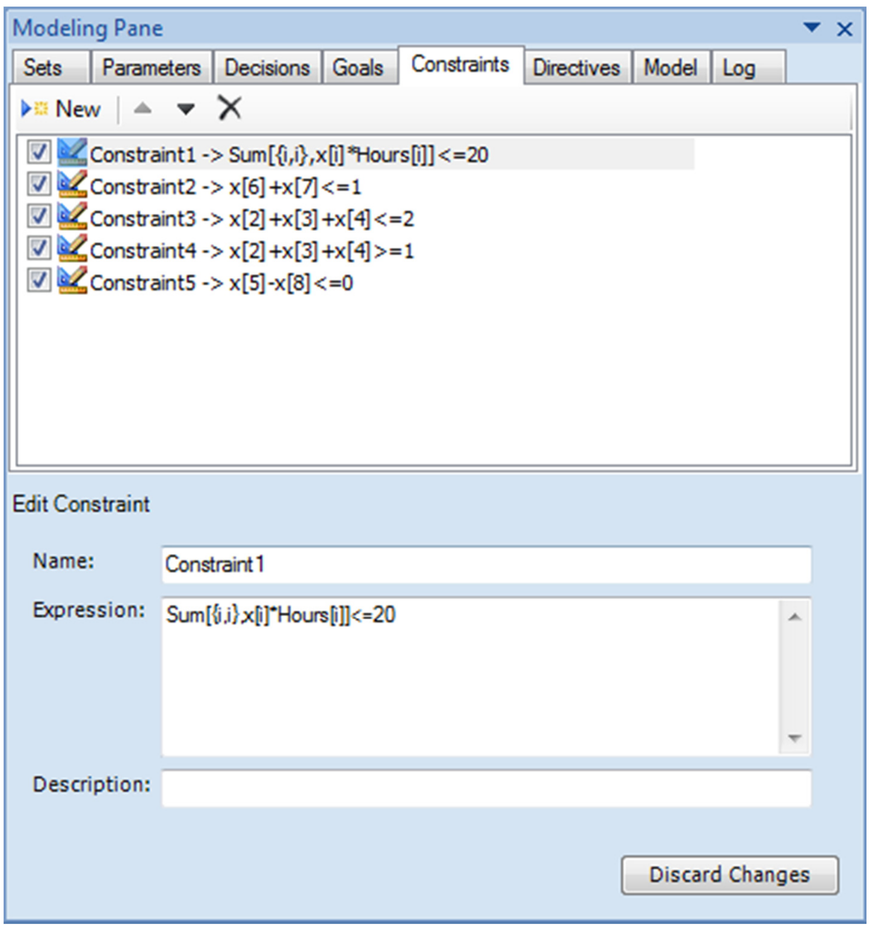


Εικόνα 5.10: Η καρτέλα Goals

Το πρώτο βήμα είναι να δώσουμε ένα όνομα στο στόχο μας (MaxBenefit). Ο τύπος (Kind) του στόχου είναι είτε Maximize ή Minimize (στην περίπτωσή μας maximize αφού θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε το κόστος). Η διατύπωση (Expression) αποτελεί κείμενο που συνδυάζει τα δεδομένα εισόδου και εξόδου ή άλλες τιμές (σταθερές) χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες της OML. Εδώ κάνουμε χρήση του operator (χειριστή) Sum ώστε να αθροίσουμε όλα τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν και αντιστοιχούν στο δείκτη "i", δηλαδή το γινόμενο "x[i]*Benefit[i]".

5.2.2.2 Constraints

Ένας περιορισμός (constraint) αποτελεί μια έκφραση που περιορίζει πιθανές τιμές για τις αποφάσεις. Πολλοί περιορισμοί προκύπτουν λογικά από τη φύση του προβλήματος, π.χ. «το σύνολο της ζήτησης των επιμέρους αγορών ισούται με τη συνολική ζήτηση». Άλλοι περιορισμοί εκφράζουν όρια που θέτουμε στον προγραμματισμό μας, όπως συμβαίνει και στο παράδειγμά μας όπου βάζουμε όριο στο διαθέσιμο χρόνο μας:



Εικόνα 5.11: Η καρτέλα Constraints

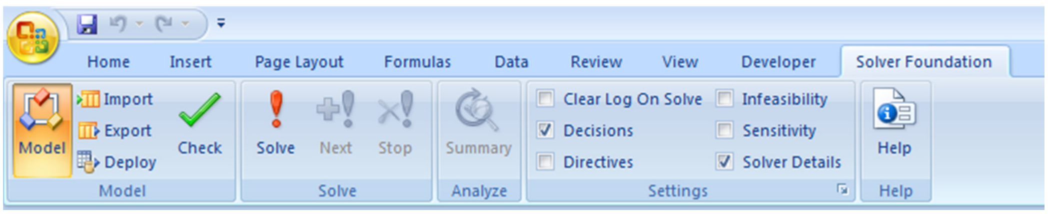
Οι υπόλοιποι περιορισμοί αποτελούν συνθήκες επιλογής ή όχι ενός μαθήματος.

5.2.2.3 Directives

Ενώ οι παράμετροι, οι αποφάσεις, οι στόχοι και οι περιορισμοί περιγράφουν το περιεχόμενο ενός μοντέλου, οι οδηγίες (directives) καθορίζουν τη συμπεριφορά του solver, του τρόπου δηλαδή της επίλυσης του μοντέλου. Η χρήση τους είναι εντελώς προαιρετική.

5.3 Ελέγχοντας και επιλύοντας το μοντέλο – Η κορδέλα

Η κορδέλα (ribbon tab) του Solver Foundation περιλαμβάνει πολλά χαρακτηριστικά κατασκευής, επίλυσης και ανάλυσης μοντέλων.



Εικόνα 5.12: Η καρτέλα στην κορδέλα του Excel

Model - Αποτελεί τη βασική λειτουργία επίδειξης, εισαγωγής, εξαγωγής και ανάπτυξης μοντέλων.

- **Model** – Εμφανίζει ή κρύβει το παράθυρο μοντελοποίησης.
- **Import** - Υποστηρίζει την εισαγωγή αρχείων OML, MPS και QPS.
- **Export** – Σώνει το μοντέλο σε OML, MPS ή QPS (όταν επιτρέπεται).
- **Deploy** – Το μοντέλο μπορεί να αναπτυχθεί σε SharePoint (μέσω OMLX φορμά) ή Visual Studio (μέσω C#).
- **Check** – Εκτελεί συντακτικό έλεγχο στο μοντέλο. Τα αποτελέσματα αυτού του ελέγχου προβάλλονται στο Log στο παράθυρο μοντελοποίησης.

Solve – Περιλαμβάνει τα κουμπιά εκτέλεσης, επανεκτέλεσης και διακοπής επίλυσης του μοντέλου.

- **Solve** – Τρέχει τον κατάλληλο solver και παρουσιάζει τα αποτελέσματα στο φύλλο “Solver Foundation Results”.
- (Solve) **Next** – Εκτελεί επανάληψη σε προβλήματα CSP που έχουν πολλαπλές λύσεις. Οι πιθανές λύσεις φαίνονται διαδοχικά στο φύλλο “Solver Foundation Results” που δημιουργείται.
- **Stop** – Διακόπτει τον έλεγχο, την επίλυση ή τη δημιουργία σύνοψης (των λειτουργιών δηλαδή Check, Solve και Summary).

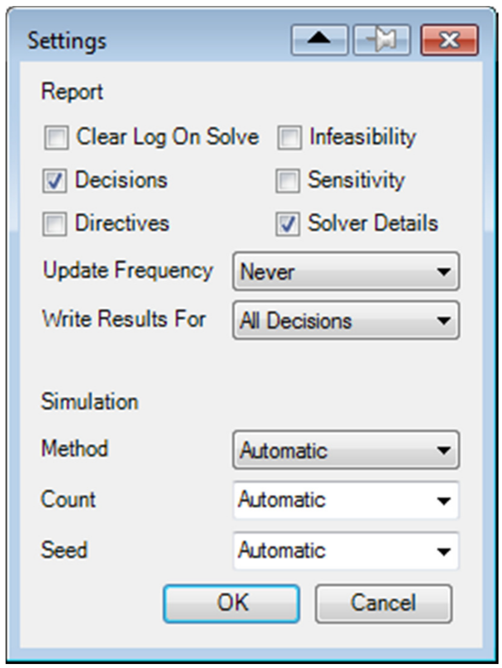
Summary – Παράγει μια πιο λεπτομερή αναφορά κι επιπρόσθετα λεπτομέρειες εκτέλεσης του solver.

Settings – Αυτές οι επιλογές επιτρέπουν στο χρήστη να ρυθμίσουν ποιες λεπτομέρειες θα παρουσιαστούν.

- **Clear Log On Solve** – Τα περιεχόμενα της καρτέλας Log θα σβήνονται κάθε φορά που εκτελείται ο solver.

- **Decisions** – Εμφανίζει λεπτομερείς πληροφορίες για τις αποφάσεις όταν είναι διαθέσιμες.
- **Directives** – Παρουσιάζει πληροφορίες για τις οδηγίες εκτέλεσης του solver.
- **Infeasibility** – Περιλαμβάνει πληροφορίες ευαισθησίας του solver.
- **Sensitivity** – Περιλαμβάνει πληροφορίες εφικτότητας επίλυσης του μοντέλου.
- **Solver Details** – Περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το χρόνο επίλυσης, χρήσης αλγορίθμου, κτλ.

Κάνοντας κλικ στο εικονίδιο στην κάτω γωνία του group έχουμε διαθέσιμο το παράθυρο πρόσθετων ρυθμίσεων:



Εικόνα 5.13: Οι επιπλέον ρυθμίσεις στην καρτέλα της κορδέλας

Η ρύθμιση που αντιστοιχεί στη συχνότητα ενημέρωσης (Update Frequency) ελέγχει το πόσο συχνά το πρόσθετο εξάγει αποτελέσματα στο Log.

Ένα έγκυρο μοντέλο μπορεί να επιλυθεί οποτεδήποτε με τη χρήση απλά του κουμπιού Solve. Το MSF παράγει αυτόματα αποτελέσματα κι αν καθορίσουμε κελιά για τα δεδομένα εξόδου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα εξαχθέντα αποτελέσματα στην κατασκευή γραφημάτων, κτλ.

6. Μια «real-life» εφαρμογή

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσαρμόσουμε μερικώς ένα "real-life" πρόβλημα στο Excel βασιζόμενοι στα όσα είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, όπως αυτό αναλύεται στην εργασία "Combining Mathematical Programming and Monte Carlo simulation to deal with uncertainty in energy project portfolio selection" (Mavrotas and Pechak, 2011). Για την καλύτερη κατανόηση και εμπέδωση στη χρήση του προγράμματος θα γίνονται συχνά αναφορές σε προηγούμενες ενότητες ή εικόνες, ώστε να καθίστανται σαφέστερα τα επιμέρους στάδια ανάπτυξης του μοντέλου και η λογική τους αλληλουχία. Πρώτα όμως μια σύντομη περίληψη του προβλήματος.

6.1 Το πρόβλημα

Για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, το πρωτόκολλο του Κιότο προβλέπει μηχανισμούς μείωσης των εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου (GHG), ένας εκ των οποίων είναι ο CDM (Clean Development Mechanism), που παρέχει την πιθανότητα αντιστάθμισης των εκπομπών άνθρακα με φιλικές προς το περιβάλλον ενέργειες. Πρόκειται συνήθως για έργα που υλοποιούνται σε αναπτυσσόμενες χώρες με τη χρήση τεχνολογικών και οικονομικών πόρων από αναπτυγμένες χώρες. Τα κέρδη που αποκομίζει ο χρηματοδότης ενός τέτοιου έργου είναι «περιβαλλοντικά» οφέλη που ποσοτικοποιούνται σαν μονάδες CERs (Certified Emission Reduction) που μειώνουν την «ισορροπία εκπομπών». Το πρόβλημά μας αναφέρεται σ' αυτά τα έργα κι αποτελεί κυρίως ένα πρόβλημα επιλογής χαρτοφυλακίου έργων.

Η επιλογή έργων ορίζεται σαν πρόβλημα επιλογής ενός ή μέρους αυτών από ένα σύνολο έργων. Στη δεύτερη περίπτωση η συνήθης προσέγγιση είναι η κατηγοριοποίηση των έργων χρησιμοποιώντας κάποια κριτήρια και στη συνέχεια η επιλογή αυτών που ικανοποιούν αθροιστικά αποτελεσματικότερα τον προϋπολογισμό. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν δύο λόγοι που περιπλέκουν την επιλογή: α) η ύπαρξη περιορισμών και ορίων που θέτει ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων και β) η αβεβαιότητα που συνοδεύει τη εκτίμηση ενός έργου.

Όσο αφορά το πρώτο ζήτημα, η ύπαρξη περιορισμών που πρέπει να ικανοποιούνται από την τελική επιλογή καταστρέφει την ανεξαρτησία των έργων. Με άλλα λόγια το σύνολο των επιλεγμένων έργων μόνο από σύμπτωση μπορεί να ικανοποιούν τον περιορισμό. Για την αντιμετώπιση των περιορισμών το κατάλληλο εργαλείο είναι ο μαθηματικός προγραμματισμός που βελτιστοποιεί την επιλογή των έργων υπό περιορισμούς.

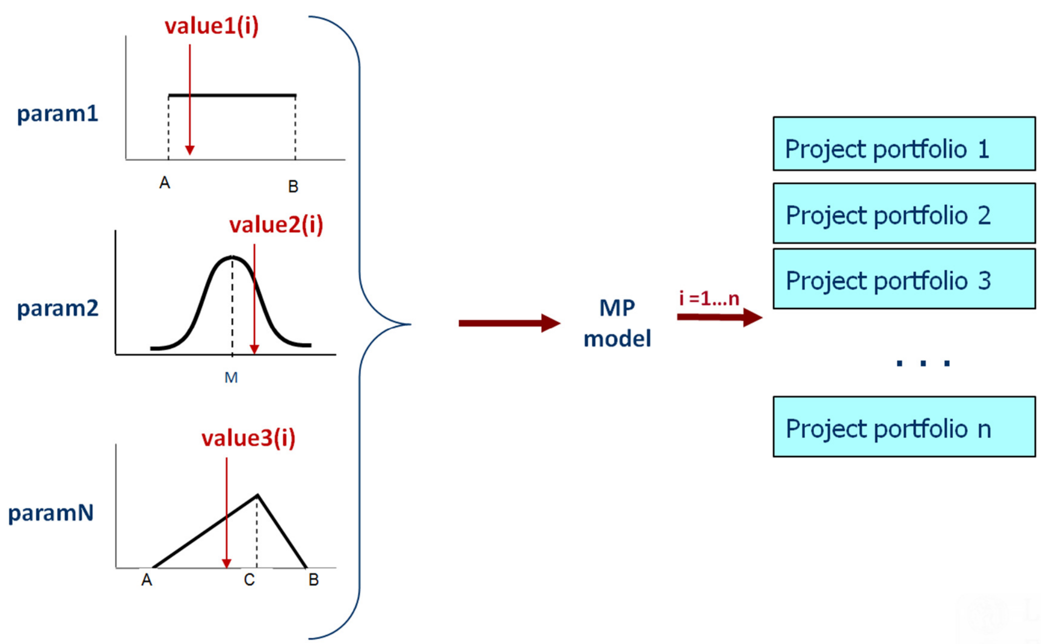
Το δεύτερο ζήτημα, που αναφέρεται στην αβεβαιότητα της εκτίμησης των έργων και συγκεκριμένα στην εκτίμηση της απόδοσής τους, αντιμετωπίζεται με τη χρήση σεναρίων ή στοχαστικών παραμέτρων. Ένα ισχυρό εργαλείο αντιμετώπισης αυτής της αβεβαιότητας είναι η προσομοίωση Monte Carlo, όπου γίνεται δειγματοληπτική προσέγγιση με σχετική πιθανότητα των δεδομένων εισόδου, από τα οποία λαμβάνουμε τα δεδομένα εξόδου με τις σχετικές πληροφορίες. Όσο περισσότερες είναι οι επαναλήψεις που θα πραγματοποιήσουμε, τόσο πιο αξιόπιστη θα είναι και η εκτίμηση των αποτελεσμάτων που λαμβάνουμε.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση συνδυάζουμε αυτές τις δύο τεχνικές, δηλ. τον μαθηματικό προγραμματισμό και την προσομοίωση Monte Carlo.

6.2 Προσομοίωση Monte Carlo – Αριστοποίηση με Μαθηματικό Προγραμματισμό

Η εξομοίωση Monte Carlo κι η αριστοποίηση με μαθηματικό προγραμματισμό αποτελούν σχετικά πρόσφατες εξελίξεις, που οφείλονται κυρίως στην τεράστια ανάπτυξη της επεξεργαστικής δύναμης των υπολογιστών τα τελευταία χρόνια. Αν κι είναι απαιτητικές σε επεξεργαστική ισχύ, αξίζουν τον κόπο καθώς παρέχουν σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά την αβεβαιότητα της τελικής λύσης.

Χρησιμοποιώντας την προσομοίωση Monte Carlo μπορούμε να θεωρήσουμε διάφορες κατανομές πιθανοτήτων για τις αβέβαιες παραμέτρους. Δειγματοληπτώντας από αυτές τις κατανομές λαμβάνουμε παραμέτρους για το μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού το οποίο βελτιστοποιείται στη συνέχεια. Η διαδικασία εκτελείται N φορές (το N πρέπει να είναι σχετικά μεγάλος αριθμός, π.χ. 1000) και παραλαμβάνουμε N βελτιστοποιημένα χαρτοφυλάκια που εκφράζουν όλες τις πιθανές περιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν (κάποια μπορεί να είναι πανομοιότυπα). Στο σχήμα 6.1 βλέπουμε τα στάδια επίλυσης με χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo:



Σχήμα 6.1: Η προσομοίωση Monte Carlo

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε δειγματοληψία παραμέτρων από τρεις τύπους κατανομών. Στην περίπτωσή μας λαμβάνουμε παραμέτρους μόνο από κανονική κατανομή.

Το μαθηματικό μοντέλο για t επαναλήψεις Monte Carlo είναι το ακόλουθο:

$$\max Z^{(t)} = \sum_{i=1}^{p} c_i^{(t)} X_i$$

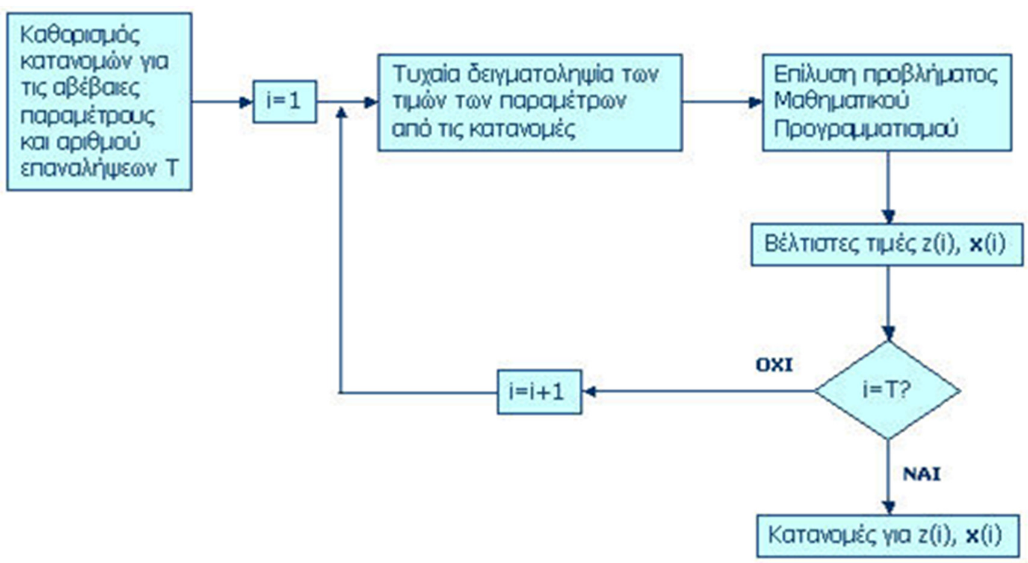
st

$\mathbf{X} \in S$

$X_i \in \{0,1\}$

όπου $c_i^{(t)}$ είναι ο συντελεστής της αντικειμενικής συνάρτησης (κάποιο δεδομένο εξόδου) του έργου i στην t επανάληψη Monte Carlo. Η τιμή του $c_i^{(t)}$ προκύπτει με δειγματοληψία από την αντίστοιχη κατανομή. X_i είναι η δυαδική μεταβλητή απόφασης που υποδεικνύει αν το έργο i έχει επιλεγεί (X_i=1) ή όχι (X_i=0) και το S αντιπροσωπεύει την εφικτή περιοχή που τυποποιείται από τους εκάστοτε περιορισμούς. Δε μπορούμε να επιλέξουμε μέρος κάποιο έργου, γι' αυτό κι η μοντελοποίηση γίνεται με δυαδικές μεταβλητές κι όχι συνεχείς, κάτι σύνηθες σε προβλήματα επιλογής χαρτοφυλακίου.

Η διαδικασία κατά την οποία συνδυάζουμε την προσομοίωση Monte Carlo με το Μαθηματικό Προγραμματισμό φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.2: Flowchart της διαδικασίας επίλυσης με συνδυασμό ΜΑΓΠ και Monte Carlo

6.3 Τα δεδομένα του προβλήματος

Θα χρησιμοποιήσουμε ένα υποθετικό σετ έργων, βασισμένο σε πραγματικά δεδομένα. Η πηγή μας είναι η βάση δεδομένων του CDM. Κάθε δραστηριότητα πριν καταγραφεί καταθέτει ένα σχέδιο έργου (Project Design Document) όπου περιγράφονται και υπολογίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια κατά τη λειτουργία τους τα καταγραμμένα έργα γίνονται αντικείμενα παρακολούθησης και επαλήθευσης της απόδοσής τους σύμφωνα με το εγκεκριμένο πρόγραμμα.

Επικεντρώνουμε την προσοχή μας στα έργα εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που αντιπροσωπεύονται από τις παρακάτω τεχνολογίες:

- Αιολική ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Βιομάζα
- Μείωση εκπομπών αερίων από χώρους υγειονομικής ταφής
- Μείωση εκπομπών μεθανίου
- Έργα αύξησης της ενεργειακής απόδοσης βιομηχανιών (EE)

Τα έργα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο και το νερό είναι κυρίαρχες τεχνολογίες κι ένα μεγάλο μέρος έργων εμπίπτει σε αυτή την κατηγορία. Με στόχο να βελτιώσουμε τη διαδικασία επιλογής χωρίζουμε αυτά τα έργα σε μικρής κλίμακας (μέχρι 15 MW εγκατεστημένης χωρητικότητας) και μεγάλης κλίμακας (ανώτερης των 15 MW) έργα. Για να ξεχωρίσουμε τους δύο τύπους έργων σηματοδοτούμε τα μικρής κλίμακας με ένα “S” στην αρχή (SWind, SHydro) και τα μεγάλης με ένα “L” (LWind, LHydro). Τα υπόλοιπα δεν είναι αρκετά, ώστε να χρειάζεται διαχωρισμός τους.

Η γεωγραφική κατανομή των έργων καλύπτει 17 χώρες (Αργεντινή, Βραζιλία, Χιλή, Κίνα, Εκουαδόρ, Αίγυπτος, Ονδούρα, Ινδία, Ινδονησία, Μαλαισία, Μεξικό, Περού, Φιλιππίνες, Νότια Αφρική, Νότια Κορέα, Ταϋλάνδη και Βιετνάμ), οι οποίες σύμφωνα με τη συνθήκη του Κιότο θεωρούνται αναπτυσσόμενες.

Κατά την εκτίμηση των έργων δίνεται μεγάλη έμφαση στην περιβαλλοντική τους απόδοση. Σε διάφορες περιπτώσεις ο μηχανισμός CDM κρίθηκε ανεπαρκής σε αυτόν τον τομές κι έτσι τρίτες εταιρίες προχώρησαν σε εκτίμηση της βιωσιμότητάς τους. Έτσι προέκυψε η ζήτηση για πριμοδοτημένα CERs, γνωστή σαν επισήμανση GS (Gold Standard), που πιστοποιεί την υψηλή απόδοση των έργων.

Η επιλογή των έργων γίνεται μόνο από όσα είναι καταγραμμένα καθώς έχουμε περισσότερες πληροφορίες γι αυτά. Έτσι επιλέγουμε 300 αντιπροσωπευτικά συγκεκριμένης τεχνολογίας και γεωγραφικών χαρακτηριστικών.

Πίνακας 6.1: Δεδομένα του προβλήματος

	SWind	Lwind	SHydro	LHydro	Biomass	Landfill gas	Methane avoidance	EE own generation	*GS*	*Budget MUS$*	*kCERs/ year*	**Total projects**
China	5	53	21	27	2	6	4	10	*40*	*6733*	*2588*	**128**
India	36	4	10	5	15	1	2	6	*10*	*979*	*17050*	**79**
Argentina	0	0	0	0	1	1	0	0	*0*	*42*	*305*	**2**
Brazil	0	1	4	4	0	2	0	1	*0*	*541*	*885*	**12**
Chile	0	1	2	3	2	0	0	0	*1*	*490*	*1346*	**8**
Ecuador	1	0	0	2	0	0	0	0	*0*	*62*	*210*	**3**
Egypt	0	1	0	0	0	0	0	1	*0*	*135*	*359*	**2**
Honduras	0	0	1	0	0	0	1	0	*1*	*10*	*54*	**2**
Indonesia	0	0	0	0	2	1	3	0	*3*	*52*	*361*	**6**
Malaysia	0	0	0	0	5	1	4	0	*0*	*44*	*686*	**10**
Mexico	0	4	0	1	0	3	1	0	*0*	*1396*	*2101*	**9**
Peru	0	0	3	3	0	0	0	0	*0*	*360*	*879*	**6**
Philippines	0	1	0	0	1	0	1	1	*0*	*104*	*191*	**4**
South Africa	0	0	0	0	1	2	1	0	*0*	*30*	*133*	**4**
South Korea	1	1	2	1	0	0	0	0	*0*	*243*	*501*	**5**
Thailand	0	0	0	0	2	1	10	1	*6*	*161*	*958*	**14**
Vietnam	0	1	2	3	0	0	0	0	*2*	*119*	*198*	**6**
Gold Standard	*3*	*33*	*2*	*2*	*8*	*2*	*12*	*1*	*63*			
Budget MUS$	*436*	*6861*	*400*	*2555*	*389*	*165*	*105*	*593*	2846			
kCERs/year	639	11059	1257	6898	1794	3075	1439	2644	6242			
totals	**43**	**67**	**45**	**49**	**31**	**18**	**27**	**20**	**63**	**11501**	**28805**	**300**

Στο μοντέλο μας τα έργα κωδικοποιούνται ανάλογα με την τεχνολογία που υλοποιούν: Small scale wind: 1-43, Large scale wind: 44-110, Small scale hydro: 111-155, Large scale hydro: 156-204, Biomass: 205-235, EE own generation: 236-255, Landfill gas: 256-273, Methane avoidance: 274-300. Επίσης χρησιμοποιούμε την πιστοποίηση GS που παίρνει την τιμή “1” αν υπάρχει για το αντίστοιχο έργο ή “0” αν δεν υπάρχει.

6.4 Μοντελοποίηση του προβλήματος

6.4.1 Η αντικειμενική συνάρτηση

Ένα απ’ τα κύρια κριτήρια, αν όχι το σημαντικότερο, στην επιλογή ενός έργου είναι το ύψος των CERs. Όταν κατατίθεται ένα έργο δηλώνεται και το αναμενόμενο CER. Παρόλα αυτά η εμπειρία δείχνει ότι τα δηλωμένα CERs συνήθως διαφέρουν από το πραγματικό ποσό που επιτυγχάνεται μετά την υλοποίηση του έργου. Στη προσπάθεια ποσοτικοποίησης αυτής της αβεβαιότητας, εκφράζεται στατιστικά η αναμενόμενη επιτυχία ενός έργου ανά τεχνολογία, βάση ιστορικών στοιχείων. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αναμενόμενη επιτυχία ενός έργου, που προκύπτει σαν λόγος των δηλωμένων έναντι των πραγματικών CERs επί τοις εκατό:

Πίνακας 6.2: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση επιτυχίας έργου

Τεχνολογία	Σύνολο Έργων	Μέση τιμή Επιτυχίας (avis)	Τυπική απόκλιση (sdis)
SWind	179	85%	0,200
LWind	191	90%	0,250
SHydr	235	84%	0,490
LHydr	230	86%	0,280
Biomass	174	84%	0,349
EE own generation	97	77%	0,247
Landfill	90	52%	0,358
Methane Avoidance	122	61%	0,375

Στο μοντέλο μας, τα πραγματικά CERs του χαρτοφυλακίου αποτελούν την αντικειμενική συνάρτηση προς μεγιστοποίηση. Δεδομένης της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την επιτυχία ενός έργου σε σχέση με την τεχνολογία που υλοποιεί, λαμβάνουμε τις ανάλογες τιμές από τις κανονικές κατανομές με τα χαρακτηριστικά του παραπάνω πίνακα. Επομένως οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης είναι τυχαίες παράμετροι που προκύπτουν δειγματοληπτικά από τις κανονικές κατανομές με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$\mathrm{c}^{(t)}{}_{\mathrm{i}} = \mathrm{expcer}_{\mathrm{i}} * \mathrm{normal}(\mathrm{avis}_{\mathrm{j}}, \mathrm{sdis}_{\mathrm{j}})$$

όπου $c^{(t)}{}_{i}$ είναι ο συντελεστής της αντικειμενικής συνάρτησης που δηλώνει τα πραγματικά CERs για το έργο i σύμφωνα με τη δειγματοληψία j, $\mathrm{expcer}_{\mathrm{i}}$ είναι τα αναμενόμενα CERs που δηλώνονται με την καταβολή του έργου, $\mathrm{avis}_{\mathrm{j}}$ η μέση τιμή της επιτυχίας της τεχνολογίας j που υλοποιεί το έργο i και $\mathrm{sdis}_{\mathrm{j}}$ η τυπική απόκλιση της τεχνολογίας j. Οι δύο τελευταίοι παράμετροι λαμβάνονται από τον πίνακα. Ο δεύτερος όρος του πολλαπλασιασμού δηλώνει ότι η παράμετρος λαμβάνεται από την κανονική κατανομή με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οπότε η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι:

$$\max Z^{(t)} = \sum_{i=1}^{p} c_i^{(t)} X_i$$

όπου $Z^{(t)}$ είναι ο συνολικός αριθμός των kCERs που επιτεύχθηκαν από το χαρτοφυλάκιο $\mathrm{p}^{(\mathrm{t})}$ στην t επανάληψη της προσομοίωσης Monte Carlo, $c_i^{(t)}$ ο αριθμός των kCERs του έργου i όπως λήφθηκε στην t επανάληψη Monte Carlo και X_i η δυαδική μεταβλητή που δηλώνει αν το έργο i επιλέχθηκε ή όχι.

6.4.2 Οι περιορισμοί

Οι περιορισμοί του προβλήματος εκφράζουν περιορισμούς σχεδίου που επιβάλλει ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων. Έχουν να κάνουν με την επιθυμητή αναλογία στις τεχνολογίες που θα εφαρμοστούν καθώς και με τη γεωγραφική κατανομή των έργων στο τελικό χαρτοφυλάκιο. Στην περίπτωσή μας οι περιορισμοί είναι:

(α) Περιορισμός προϋπολογισμού

Ο συνολικός προϋπολογισμός επενδύσεων για τα επιλεγμένα έργα πρέπει να είναι μικρότερος των 2 δισεκατομμυρίων US$ (και τα 300 έργα μαζί υπολογίζονται στα 11.5 δισεκατομμύρια US$)

$$\sum_{i=1}^{p} budg_i X_i \le 2000$$

όπου $budg_i$ είναι ο προϋπολογισμός του έργου i σε εκατομμύρια US$.

(β) Γεωγραφική κατανομή

Στο μοντέλο έχουν ενσωματωθεί συγκεκριμένοι περιορισμοί που αφορούν στη γεωγραφική κατανομή, που είναι σύνηθες σε πραγματικά επενδυτικά προβλήματα. Οι παρακάτω περιορισμοί αποτελούν μερικά παραδείγματα που αναδεικνύουν τις δυνατότητες μοντελοποίησης.

(β1) Το πολύ 40% των επενδύσεων θα πρέπει να είναι έργα στην Κίνα

$$\sum_{i \in China} budg_i X_i \le 0.4 \sum_{i=1}^{p} budg_i X_i$$

(β2) Το πολύ 30% των επενδύσεων θα πρέπει να είναι έργα στην Ινδία

$$\sum_{i \in India} budg_i X_i \le 0.3 \sum_{i=1}^{p} budg_i X_i$$

(β3) Τουλάχιστον 30% των επιλεγμένων έργων θα πρέπει να είναι έργα στην Λατινική Αμερική

$$\sum_{i \in LatAm} X_i \ge 0.3 \sum_{i=1}^{p} X_i$$

(γ) Τεχνολογικό μείγμα

Υπάρχουν συνθήκες που μπορεί να επηρεάσουν το τεχνολογικό μείγμα στο τελικό χαρτοφυλάκιο. Συχνά τέτοιες συνθήκες απαιτούνται ώστε να προκύψει ένα πιο ισορροπημένο χαρτοφυλάκιο αποφεύγοντας την τακτική «όλα τ' αυγά στο ίδιο καλάθι». Συνήθως προκύπτουν με δοκιμή και σφάλμα από το αρχικό μοντέλο (δίχως τους περιορισμούς στις τεχνολογίες) και χρειάζονται ώστε να διατηρηθεί μια ελάχιστη ή μέγιστη εκπροσώπηση κάθε τεχνολογίας στο τελικό χαρτοφυλάκιο. Στο παρόν μοντέλο έχουμε:

(γ1) Τουλάχιστον 40% των επενδύσεων πρέπει να είναι στην αιολική ενέργεια (έργα μικρής και μεγάλης κλίμακας)

$$\sum_{i \in Wind} budg_i X_i \geq 0.4 \sum_{i=1}^{p} budg_i X_i$$

(γ2) Τουλάχιστον 30% των επενδύσεων πρέπει να είναι στην υδροηλεκτρική ενέργεια (έργα μικρής και μεγάλης κλίμακας)

$$\sum_{i \in Hydro} budg_i X_i \geq 0.3 \sum_{i=1}^{p} budg_i X_i$$

(γ3) Οι υπόλοιπες τέσσερις τεχνολογίες δε θα πρέπει να έχουν χωριστά περισσότερο από 10% των επενδύσεων

$$\sum_{i \in Biomass} budg_i X_i \leq 0.1 \sum_{i=1}^{p} budg_i X_i$$

$$\sum_{i \in EEff} budg_i X_i \leq 0.1 \sum_{i=1}^{p} budg_i X_i$$

$$\sum_{i \in Landfill} budg_i X_i \leq 0.1 \sum_{i=1}^{p} budg_i X_i$$

$$\sum_{i \in MethAv} budg_i X_i \leq 0.1 \sum_{i=1}^{p} budg_i X_i$$

(γ4) Τα έργα με πιστοποίηση GS θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 30% των συνολικών έργων στο τελικό χαρτοφυλάκιο

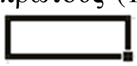
$$\sum_{i \in GoldStd} X_i \geq 0.3 \sum_{i=1}^{p} X_i$$

Οι παραπάνω περιορισμοί αποτελούν παραδείγματα περιορισμών, τους οποίους ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων μπορεί να αντιμετωπίσει σε πραγματικές συνθήκες. Περαιτέρω περιορισμοί μπορεί να τεθούν αν είναι διαθέσιμοι. Γενικά η μοντελοποίηση με μικτό ακέραιο προγραμματισμό είναι ιδιαίτερα ευέλικτη.

6.5 Εφαρμόζοντας το μοντέλο στο Excel

Στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου 5 έγινε μια αναλυτική παρουσίαση του προβλήματος, ώστε να είμαστε σε θέση να κατανοήσουμε τι ακριβώς θέλουμε από να επιτύχουμε κατά τη διαδικασία μοντελοποίησής του. Έχοντας θέσει λοιπόν σαφώς τις παραμέτρους του προβλήματος είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε την προσαρμογή του στο Excel.

6.5.1 Εισαγωγή δεδομένων

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2, το πρώτο στάδιο στο χτίσιμο του μοντέλου είναι η εισαγωγή των δεδομένων μας σ' ένα φύλλο εργασίας, που αποτελεί ίσως και το δυσκολότερο βήμα κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης στο Excel. Δεδομένα εισόδου, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 5.2.1, είναι οι δείκτες κι οι παράμετροι του προβλήματος. Κατά τη μοντελοποίηση του προβλήματος στο κεφάλαιο 6.4 γίνεται φανερό ότι σαν set (δείκτη) θα χρησιμοποιήσουμε το i που αντιστοιχεί στις παραμέτρους και την απόφαση του προβλήματος (c, budg, expcer, X) κι εκφράζει τον αριθμό που αντιστοιχεί σε κάθε έργο. Δεδομένου ότι ο συνολικός αριθμός των έργων είναι 300, οι τιμές που θα παίρνει ο δείκτης i θα κυμαίνεται μεταξύ 1-300. Κατασκευάζουμε λοιπόν μια στήλη στο φύλλο εργασίας "Sheet1" για τις τιμές αυτές του i με τίτλο στήλης "I". Το Excel μας δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε αυτόματα μια σειρά αριθμών με ποικίλους τρόπους. Ένας απ' αυτούς είναι εισάγοντας τους δύο πρώτους (1, 2) και έχοντας δηλωμένα και τα δύο κελιά σέρνουμε το "fill handle"  (το τετραγωνάκι στο κάτω δεξί τμήμα) ως το κελί που θέλουμε να γεμίσουμε. Ένας άλλος τρόπος είναι με χρήση της συνάρτησης ROW που επιστρέφει τον αριθμό της γραμμής στην οποία αναφέρεται (πληκτρολογώντας "=ROW(A1)" παίρνουμε την τιμή "1") και ξανά σέρνοντας το "fill handle" μέχρι το επιθυμητό κελί.

Στο πρόβλημά μας δε θα χρησιμοποιήσουμε άλλα sets, οπότε περνάμε στην εισαγωγή των παραμέτρων. Οι παράμετροι μας είναι η τεχνολογία που υλοποιεί ένα έργο, η χώρα στην οποία θα γίνει, ο προϋπολογισμός του, τα δηλωθέντα και τα πραγματικά CERs κι η πιστοποίηση Gold Standard.

Στον πίνακα 6.1 φαίνονται οι τιμές των περισσοτέρων παραμέτρων. Ο συνολικός αριθμός των έργων που αντιστοιχεί σε κάθε τεχνολογία βρίσκεται στη τελική γραμμή του πίνακα (Swind-43, LWind-67, …). Ακριβώς δίπλα στη στήλη των set κατασκευάζουμε τη στήλη που υποδηλώνει την παράμετρο της τεχνολογίας με τίτλο Type (of Technology) και θέτοντας στα πρώτα 43 κελιά την τιμή "SWIND", στα επόμενα "LWIND" κ.ο.κ.

Οι τιμές των παραμέτρων της χώρας, του προϋπολογισμού, των δηλωμένων CERs και της πιστοποίησης GS λαμβάνονται από τον κώδικα σε GAMS, περιβάλλον στο οποίο υλοποιήθηκε αρχικά το συγκεκριμένο μοντέλο. Ο κώδικας, βάση του οποίου λαμβάνονται οι συγκεκριμένες τιμές, βρίσκεται στο παράρτημα Π.1.

Ένα από τα μειονεκτήματα του πρόσθετου είναι πως δε μπορεί να διαχειριστεί χαρακτήρες σαν μεταβλητές. Έτσι αναγκαζόμαστε να αποδώσουμε έναν αντιπροσωπευτικό αριθμό σε κάθε χώρα προκειμένου το πρόγραμμα να είναι σε θέση να διακρίνει σε ποια χώρα αναφέρεται. Στη συνέχεια εισάγουμε μια νέα στήλη στα δεξιά της στήλης που περιέχει την παράμετρο της χώρας με τίτλο "CID", ώστε να φαίνονται οι αντιστοιχίσεις. Ένα εύλογο ερώτημα θα ήταν γιατί δε κάναμε το ίδιο με την παράμετρο της τεχνολογίας που περιέχει χαρακτήρες. Η απάντηση είναι ότι η παράμετρος αυτή χειραγωγείται μέσω του δείκτη i, η οποία έχει τεθεί για διευκόλυνση με συνεχή τρόπο, δηλαδή οι τιμές του i 1-43 αφορούν στην ίδια τεχνολογία (SWIND) κ.ο.κ. Στην ενότητα 5.2 γίνεται κάτι παρόμοιο με την χειραγώγηση της παραμέτρου των μαθημάτων που εκφράζεται μέσω του i, όπου π.χ. η τιμή i=4 αφορά το μάθημα της λογιστικής.

Τα πραγματικά CERs κατά τη μοντελοποίηση του προβλήματος (παράγραφος 6.4.1) προκύπτουν ως εξής:

$$c^{(t)}_{i} = \mathrm{expcer}_i * \mathrm{normal}(\mathrm{avis}_j, \mathrm{sdis}_j)$$

Στην προσπάθειά μας απλοποίησης της διαδικασίας μοντελοποίησης στο Excel, χρησιμοποιούμε την ενσωματωμένη συνάρτηση NORMINV, παραμετροποιώντας έτσι το συντελεστή της αντικειμενικής συνάρτησης του μοντέλου. Το αντίστοιχο της συνάρτησης normal(avis_j, sdis_j) στο Excel έχει ως εξής:

NORMINV(RAND();mean;standard_dev)

όπου RAND( ) δηλώνει τυχαία επιλογή, mean είναι η μέση τιμή και standard_dev η τυπική απόκλιση. Η κίνηση αυτή αποδεικνύεται εξαιρετικά χρήσιμη καθώς απλοποιεί το μοντέλο μας στο Excel σημαντικά, αφού ο υπολογισμός αυτός γίνεται στο φύλλο εργασίας, μη επιβαρύνοντας έτσι το μοντέλο, και παρουσιάζει άμεσα τις τιμές που παίρνει ο συντελεστής c_i σε αντιστοιχία με τις υπόλοιπες τιμές των παραμέτρων. Έτσι η συνάρτηση που θα εκφράζει τα πραγματικά CERs ενός έργου "SWIND" μέσης τιμής 0,85 και τυπική απόκλιση 0,2 θα είναι:

=H3*NORMINV(RAND();0,85;0,2)

όπου "H3" είναι το κελί που περιέχει την τιμή των δηλωθέντων CERs του αντίστοιχου έργου.

Στην ενότητα 5.2.1.2 αναφέραμε τη δυνατότητα εισαγωγής παραμέτρων κατανομής, κάτι που θα μπορούσαμε να κάνουμε και εδώ. Για να γίνει όμως αυτό θα έπρεπε να εισάγουμε επιπλέον δείκτες και παραμέτρους που θα δυσχέραιναν την κατάστρωση του μοντέλου, γι' αυτό και κάτι τέτοιο αποφεύγεται.

Τέλος ορίζουμε μια τελευταία στήλη με τίτλο "X" που θα περιέχει τις τιμές της απόφασης X_i (δεδομένο εξόδου) της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στην εικόνα 6.1 βλέπουμε πως έχουν τελικά τα εισαχθέντα δεδομένα στο φύλλο εργασίας "Sheet1":

I	Type	GS	Country	CID	Budget	Expected CERs	Actual CERs	X
1	SWIND	0	INDIA	2	8,40	78	44,61488339	
2	SWIND	0	INDIA	2	3,50	69	77,25248292	
3	SWIND	0	INDIA	2	4,40	76	21,25551221	
4	SWIND	0	CHINA	1	14,00	143	105,7898169	
5	SWIND	0	INDIA	2	7,70	153	53,66938545	
6	SWIND	0	INDIA	2	11,80	226	223,1285346	
7	SWIND	0	SKOREA	15	37,00	202	182,6792177	
8	SWIND	0	CHINA	1	22,80	204	211,286601	
9	SWIND	0	INDIA	2	4,90	72	72,91385996	
10	SWIND	0	INDIA	2	12,10	240	235,1961986	
11	SWIND	0	INDIA	2	13,00	205	205,6898291	
12	SWIND	0	INDIA	2	4,00	58	61,62378948	
13	SWIND	0	ECUAD	6	10,00	20	15,96014203	
14	SWIND	0	INDIA	2	4,50	81	61,52713012	
15	SWIND	0	INDIA	2	3,80	48	40,60364954	
16	SWIND	0	INDIA	2	5,10	90	78,99454963	
17	SWIND	0	INDIA	2	9,00	147	137,5225063	
18	SWIND	0	INDIA	2	14,90	203	194,8091842	
19	SWIND	0	INDIA	2	7,20	116	81,56169114	
20	SWIND	0	INDIA	2	14,40	231	217,476172	
21	SWIND	0	INDIA	2	2,10	27	19,2284126	
22	SWIND	0	INDIA	2	5,50	73	62,34583306	
23	SWIND	1	INDIA	2	2,30	38	30,59960934	
24	SWIND	0	CHINA	1	20,90	222	216,6128761	
25	SWIND	0	INDIA	2	14,90	196	204,1634165	
26	SWIND	0	INDIA	2	11,40	206	186,6477448	
27	SWIND	0	INDIA	2	12,20	144	84,9128662	
28	SWIND	0	INDIA	2	4,40	70	54,0738361	
29	SWIND	0	INDIA	2	5,00	60	69,82816213	
30	SWIND	1	INDIA	2	13,70	148	116,6646748	
31	SWIND	0	CHINA	1	13,70	128	135,3575917	
32	SWIND	0	INDIA	2	4,50	64	41,35166972	
33	SWIND	0	INDIA	2	1,50	32	29,37035627	
34	SWIND	0	INDIA	2	3,20	52	51,85069675	
35	SWIND	0	INDIA	2	18,50	241	243,4940068	
36	SWIND	1	INDIA	2	4,46	55	54,05908417	
37	SWIND	0	CHINA	1	19,50	217	164,4212759	
38	SWIND	0	INDIA	2	8,40	125	93,72693854	
39	SWIND	0	INDIA	2	21,40	304	301,3405881	

Sheet1 | Solver Foundation Results | Sheet2

Εικόνα 6.1: Μέρος των δεδομένων του προβλήματος περασμένα στο Excel

Οι τιμές που παίρνουμε στη στήλη των πραγματικών CERs (Actual CERs) έχουν αναπαραχθεί τυχαία σύμφωνα με τη συνάρτηση NORMINV κι ανανεώνονται με κάθε αλλαγή που μπορεί να προκύψει στο συγκεκριμένο φύλλο εργασίας.

6.5.2 Έλεγχος των εισαχθέντων δεδομένων

Μια επιπλέον δυνατότητα που μας προσφέρει το Excel σε περίπτωση μεγάλου αριθμού δεδομένων είναι ότι μπορούμε να ελέγξουμε αυτόματα αν εισάγαμε σωστά τα δεδομένα μας . Στο πρόβλημά μας κάνουμε χρήση των συναρτήσεων COUNTIF και SUMIF προκειμένου να διεξάγουμε αυτόν τον έλεγχο. Έτσι στο ίδιο φύλλο εργασίας καταστρώνουμε τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.3: Επαλήθευση εισαχθέντων δεδομένων στο Excel

Country	CID	Projects	Budget
CHINA	1	128	6732,8
INDIA	2	79	978,86
ARGENTINA	3	2	42,5
BRAZIL	4	12	541,2
CHILE	5	8	490,3
ECUADOR	6	3	61,8
EGYPT	7	2	135,2
HONDURAS	8	2	10,3
INDONESIA	9	6	52,4
MALAYSIA	10	10	44,2
MEXICO	11	9	1396,4
PERU	12	6	360,3
PHILIPPINES	13	4	104,1
SOUTH AFRICA	14	4	30,3
SOUTH KOREA	15	5	243,5
THAILAND	16	14	161,1
VIETNAM	17	6	119,3

Η στήλη με τίτλο "CID" υποδηλώνει τον αριθμό που αντιστοιχίσαμε σε κάθε χώρα. Στη στήλη "Projects" κάναμε χρήση της συνάρτησης COUNTIF ώστε να καταμετρήσουμε αν ο αριθμός των έργων που αντιστοιχεί σε μια χώρα συμβαδίζει με αυτόν που εισάγαμε, π.χ. για την Κίνα θα είναι:

=COUNTIF(E3:E302;"CHINA")

όπου E3:E302 είναι η περιοχή που περιέχει την παράμετρο της χώρας και "CHINA" είναι η τιμή της παραμέτρου που θέλουμε να καταμετρηθεί.

Στη στήλη "Budget" χρησιμοποιήσαμε τη συνάρτηση SUMIF ώστε να αθροίσουμε τον συνολικό προϋπολογισμό που αντιστοιχεί στο συνολικό αριθμό έργων που έχει κατατεθεί για μια χώρα κι έχει ως εξής:

=SUMIF(E3:E302; "CHINA"; G3:G302)

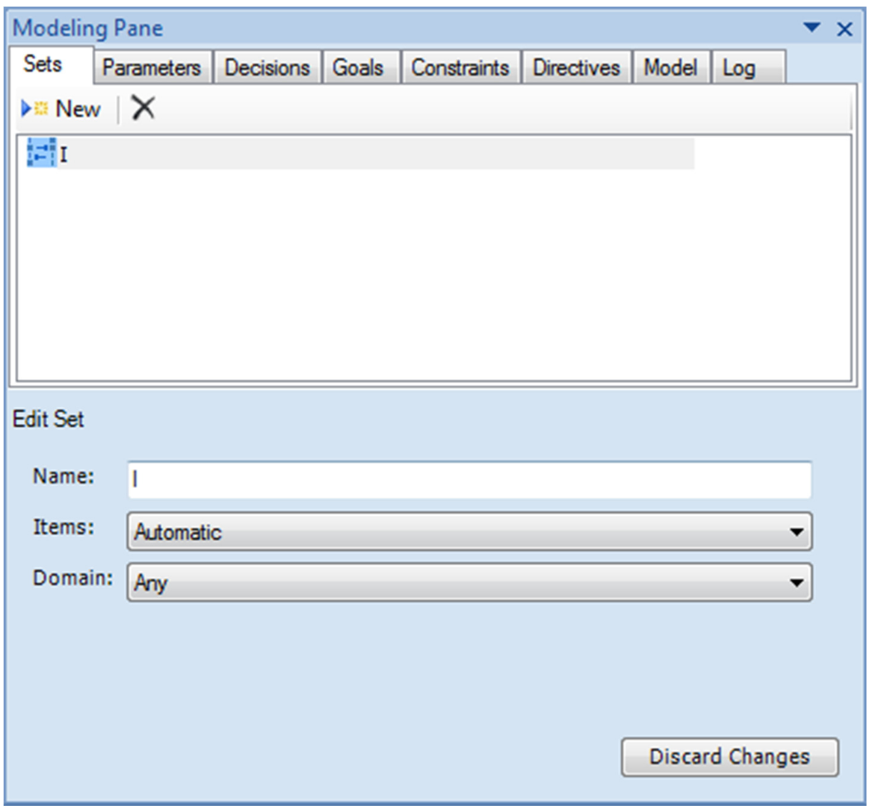
όπου E3:E302 είναι η περιοχή που περιέχει την παράμετρο της χώρας, "CHINA" η χώρα που μας ενδιαφέρει να ελεγχθεί και G3:G302 η περιοχή που περιέχει τις τιμές που θέλουμε να αθροιστούν.

Όπως παρατηρούμε, υπάρχει τέλεια αντιστοιχία των δεδομένων του πίνακα 6.1 μ' αυτή του 6.3 που είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα του ελέγχου που διεξαγάγαμε.

6.5.3 Συνδέοντας τα δεδομένα απ' το Excel στο μοντέλο

Το επόμενο βήμα, αφού εισάγαμε τα δεδομένα μας στο φύλλο εργασίας, είναι η σύνδεση αυτών των δεδομένων προς και από το μοντέλο, με χρήση του παράθυρου μοντελοποίησης του πρόσθετου. Ακολουθούμε λοιπόν τον τρόπο σύνδεσης, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 5.2.

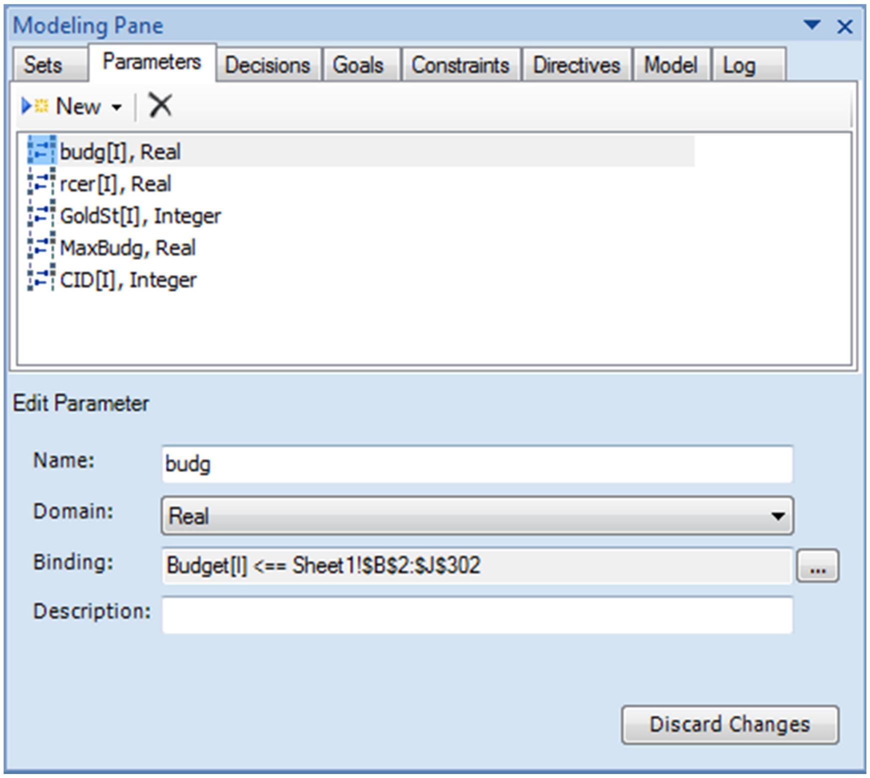
Στην πρώτη καρτέλα ορίζουμε το set "I" πατώντας to κουμπί "New" και θέτοντας στο πεδίο του ονόματος "I", ενώ αφήνουμε τις υπόλοιπες επιλογές ως έχουν για τους λόγους που αναφέραμε στην ενότητα 5.2.1.1. Χρησιμοποιούμε κεφαλαίο "I" προς αποφυγή σύγχυσης με το μικρό "i" που εμπεριέχεται σε εντολές που θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω.



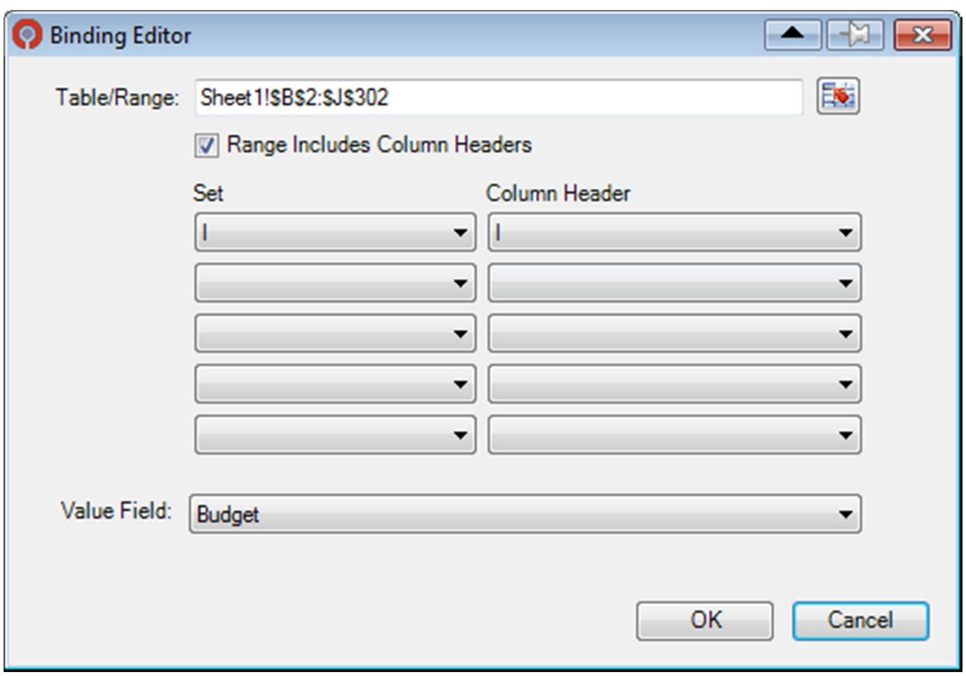
Εικόνα 6.2: Το Set Του προβλήματος

Στη δεύτερη καρτέλα εισάγουμε τις παραμέτρους του προβλήματος. Σαν περιοχή δεδομένων ορίζουμε τα κελιά B2:J302, τα οποία περιέχουν επικεφαλίδες, οπότε χρησιμοποιούμε τον τρίτο τρόπο σύνδεσης στον "Binding Editor" (βλ. 5.2.1.2). Έτσι θέτουμε τις παραμέτρους budg[I] για τον προϋπολογισμό, GoldSt[I] για την πιστοποίηση Gold Standard, rcer[I] για τα εκτιμώμενα πραγματικά CERs και CID[I] για τη χώρα, που αντικατέστησε τη στήλη που περιέχει το όνομα μιας χώρας με αριθμούς. Στην καρτέλα των παραμέτρων ορίζουμε και την παράμετρο του μέγιστου συνολικού προϋπολογισμού (MaxBudg) που μπορεί να έχει το τελικό χαρτοφυλάκιο συνδέοντας απλά ένα οποιοδήποτε κελί στο φύλλο εργασίας, που θα περιέχει την τιμή αυτή. Αυτό γίνεται δηλώνοντας στον "Binding Editor" μόνο το κελί που μας ενδιαφέρει, αφήνοντας τις υπόλοιπες επιλογές κενές. Οι παράμετροι GoldSt[I] και CID[I] ορίζονται σαν Integers (ακέραιοι), ενώ οι υπόλοιποι σαν Reals (πραγματικοί).

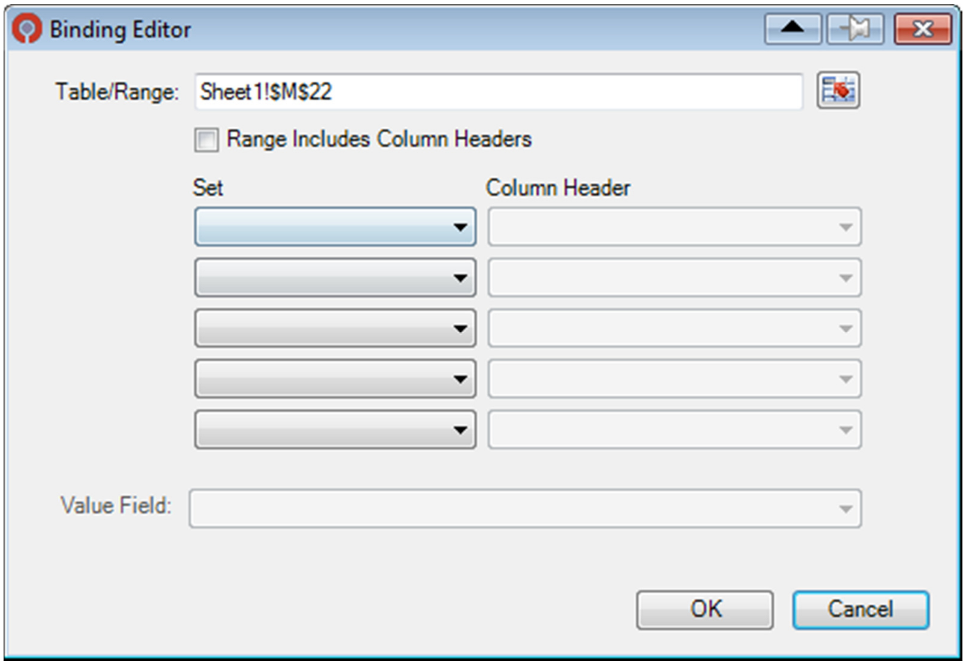
(α)



(β)

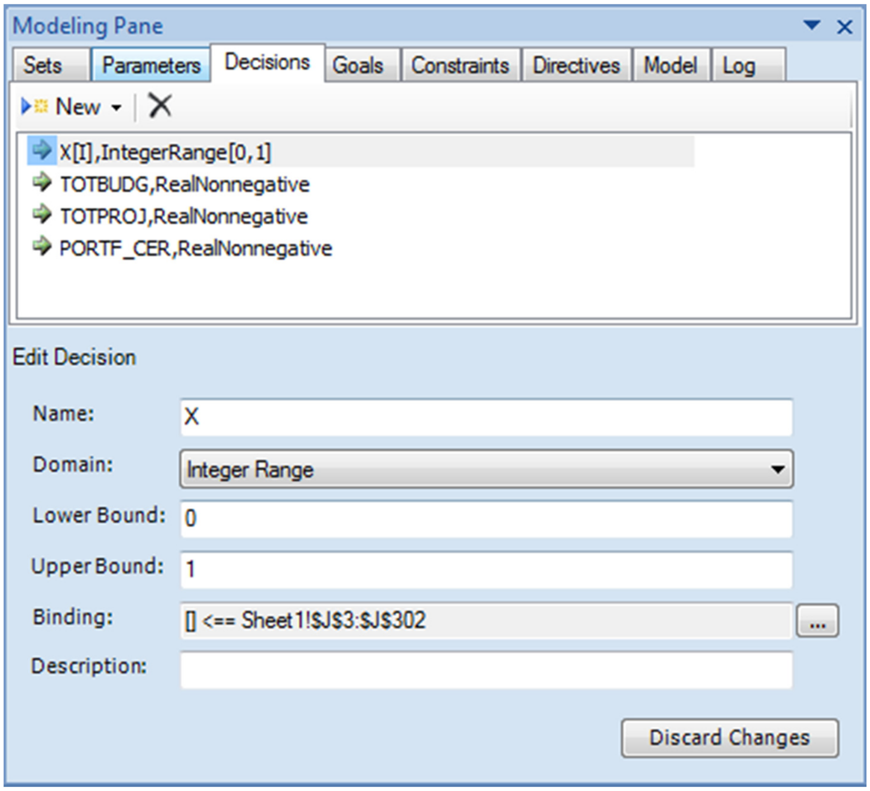


Εικόνα 6.3: (α) Οι παράμετροι του προβλήματος, (β) Μια παράμετρος στον Binding Editor



Εικόνα 6.4: Ορίζοντας μοναδικό κελί παραμέτρου

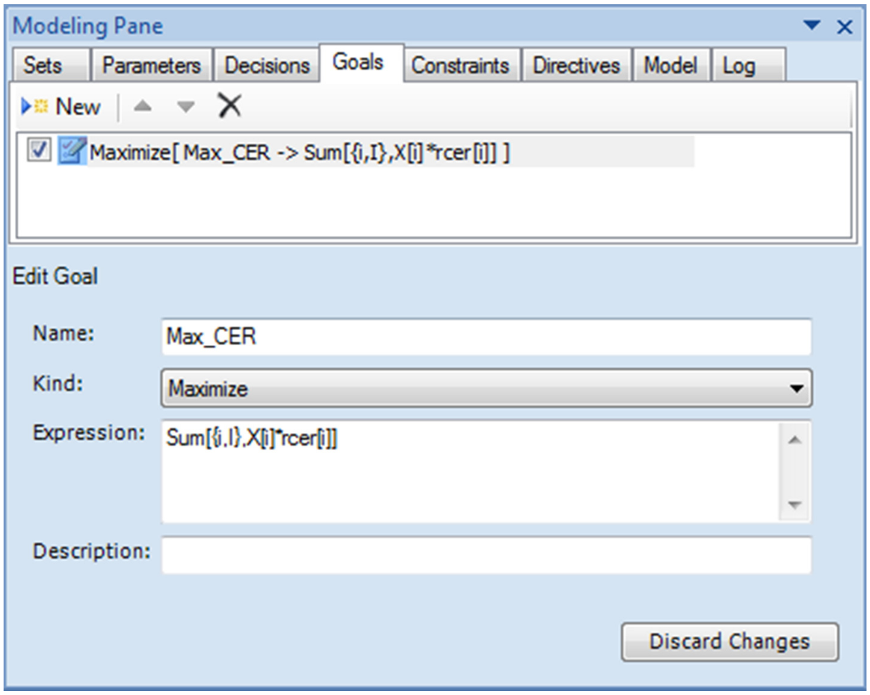
Στη συνέχεια περνάμε στην καρτέλα των αποφάσεων, όπου θέτουμε τα κελιά όπου θα αποδοθούν τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου. Όπως είπαμε (βλ. 5.2.1.3) η σύνδεση των αποφάσεων με κελιά είναι προαιρετική. Οι αποφάσεις αυτού του προβλήματος είναι η X[I] που εμπεριέχει την επιλογή ή όχι ενός έργου και παίρνει τις τιμές 0 και 1, η TOTBUDG που είναι ο συνολικός προϋπολογισμός χαρτοφυλακίου, TOTPROJ ο συνολικός αριθμός των επιλεγμένων έργων και PORTF_CER τα συνολικό ποσό των CERs που εκτιμάται για το συγκεκριμένο χαρτοφυλάκιο. Από αυτές μόνο η X ορίζεται με δείκτη I, καθώς οι υπόλοιπες αφορούν μοναδικές τιμές, κι ορίζεται σαν Integer Range με Lower Bound 0 και Upper Bound 1 κι όχι Boolean, με τον ίδιο τρόπο που είδαμε και στην παράγραφο 5.2.1.3. Το πεδίο ορισμού των υπολοίπων είναι "RealNonnegative" (μη αρνητικοί πραγματικοί). Η σύνδεση των κελιών της X γίνεται σε αντιστοιχία με τον I (κελιά J3:J302), όπως φαίνεται στην εικόνα 6.1, ενώ για τις υπόλοιπες αποφάσεις δεν έχει σημασία ποια κελιά θα επιλεγούν (αν επιλεγούν). Έτσι η καρτέλα των αποφάσεων θα έχει ως εξής:



Εικόνα 6.5: Οι αποφάσεις του προβλήματος

6.5.4 Χτίσιμο του μοντέλου

Αφού τελειώσουμε με τη σύνδεση των δεδομένων από και προς το μοντέλο, το επόμενο βήμα είναι η προσαρμογή του μοντέλου απ' τη μαθηματική του έκφραση, όπως τέθηκε στην παράγραφο 6.4, στο παράθυρο μοντελοποίησης. Αυτό γίνεται με εισάγοντάς το κυρίως στις καρτέλες των στόχων και των περιορισμών (Goals, Constraints) (η χρήση οδηγιών (Directives) είναι προαιρετική) . Η καρτέλα των στόχων περιέχει την αντικειμενική μας συνάρτηση, όπως τέθηκε στην παράγραφο 6.4.1:



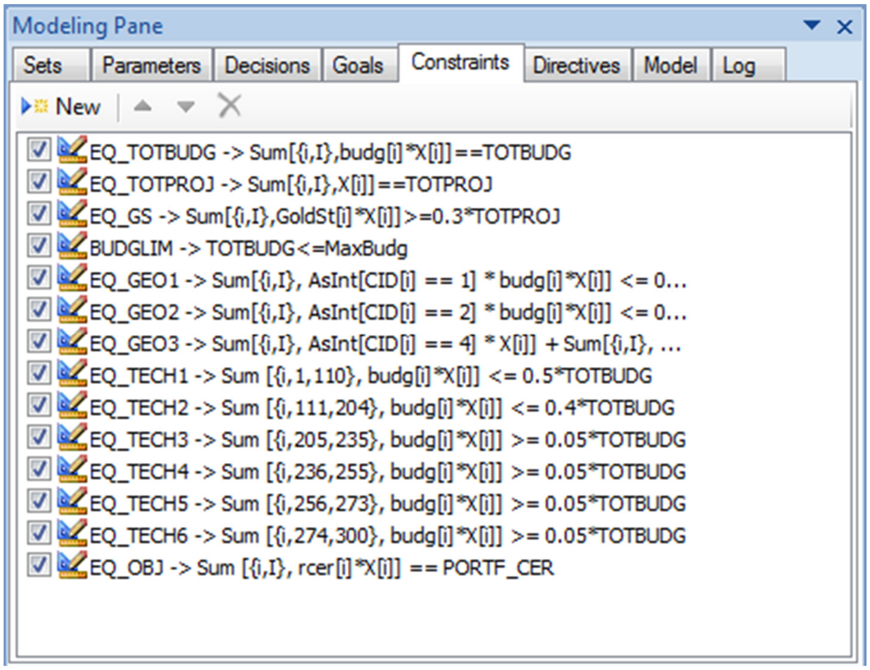
Εικόνα 6.6: Ο στόχος του προβλήματος

Εφόσον η αντικειμενική μας συνάρτηση εκφράζει σύνολο, χρησιμοποιούμε τη λειτουργία Sum, όπως εξηγήσαμε στην παράγραφο 3.3.1. Άρα θα είναι Sum[{i,I},…]. Συνολικά θα είναι:

$$\max Z^{(t)} = \sum_{i=1}^{p} c_i^{(t)} X_i \longrightarrow \text{maxMax\_CER=Sum[\{i,I\},X[i]*rcer[i]]}$$

όπου σαν όνομα του στόχου δώσαμε Max_CER, στο είδος επιλέξαμε μεγιστοποίηση (Maximize) και στο πεδίο του τύπου γράψαμε τον τύπο της συνάρτησης.

Τέλος έχουμε την καρτέλα των περιορισμών. Εδώ θα εισάγουμε τους περιορισμούς του προβλήματος, όπως τέθηκαν στην παράγραφο 6.4.2. Εκτός αυτών των περιορισμών προκύπτουν ακόμη τρεις, που αφορούν στις αποφάσεις κι είναι λογικής φύσεως, δηλ. ότι το σύνολο των X[I] θα ισούται με τον συνολικό αριθμό των επιλεγμένων έργων, το σύνολο των γινομένων budg[I]*X[I] με το συνολικό προϋπολογισμό και το σύνολο rcer[I]*X[I] με το συνολικό επιτεύξιμο ποσό CERs του συγκεκριμένου χαρτοφυλακίου. Οπότε έχουμε:



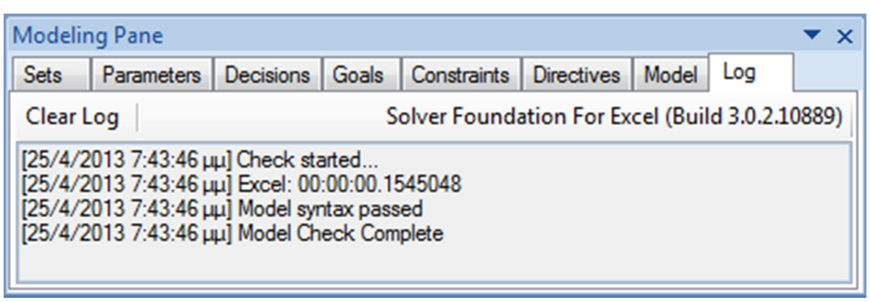
Εικόνα 6.7: Οι περιορισμοί του προβλήματος

όπου τίθενται οι τρεις περιορισμοί που αναφέραμε (EQ_TOTBUDG, EQ_TOTPROJ, EQ_OBJ), ο περιορισμός στο συνολικό προϋπολογισμό (BUDGLIM), οι γεωγραφικοί περιορισμοί (EQ_GEO1, EQ_GEO2, EQ_GEO3), οι τεχνολογικοί περιορισμοί (EQ_TECH1,…,EQ_TECH6) και τέλος ο περιορισμός στις πιστοποιήσεις Gold Standard (EQ_GS).

Οι παράμετροι της τεχνολογίας έχουν τεθεί στο φύλλο εργασίας ομαδοποιημένοι, πράγμα που μας διευκολύνει στην κατάστρωση των αθροισμάτων. Επίσης να αναφέρουμε τη χρήση της εντολής AsInt[συνθήκη] που αν δεν ισχύει παίρνει την τιμή 0 εξαλείφοντας έτσι το γινόμενο budg[i]*X[i] από το σύνολο που αθροίζεται, αντιθέτως παίρνει την τιμή 1.

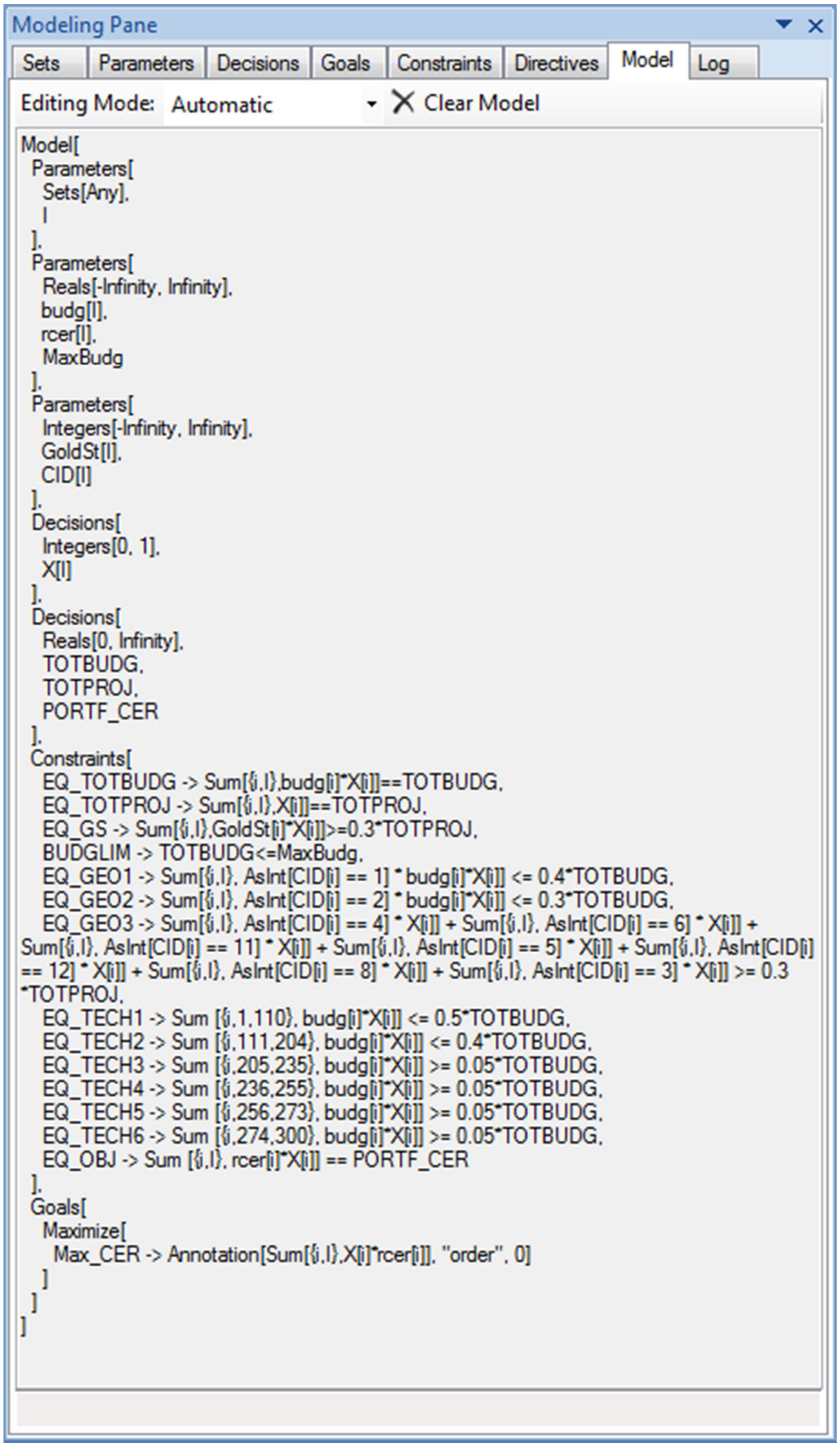
6.5.5 Επίλυση του μοντέλου

Πλέον το μοντέλο μας δείχνει έτοιμο προς επίλυση. Εκτελώντας ένα συντακτικό έλεγχο με τη χρήση του πλήκτρου "Check" στη κορδέλα του πρόσθετου βλέπουμε ότι περνά επιτυχώς τον έλεγχο αυτό.



Εικόνα 6.8: Αποτελέσματα ελέγχου μοντέλου στο Log

Στην καρτέλα “Model” έχουμε συνολικά το μοντέλο μας σε γλώσσα OML:



Εικόνα 6.9: Το μοντέλο μας σε OML

το οποίο μπορούμε πλέον να επιλύσουμε πατώντας απλά το κουμπί “Solve” στην καρτέλα του πρόσθετου στην κορδέλα του Excel.

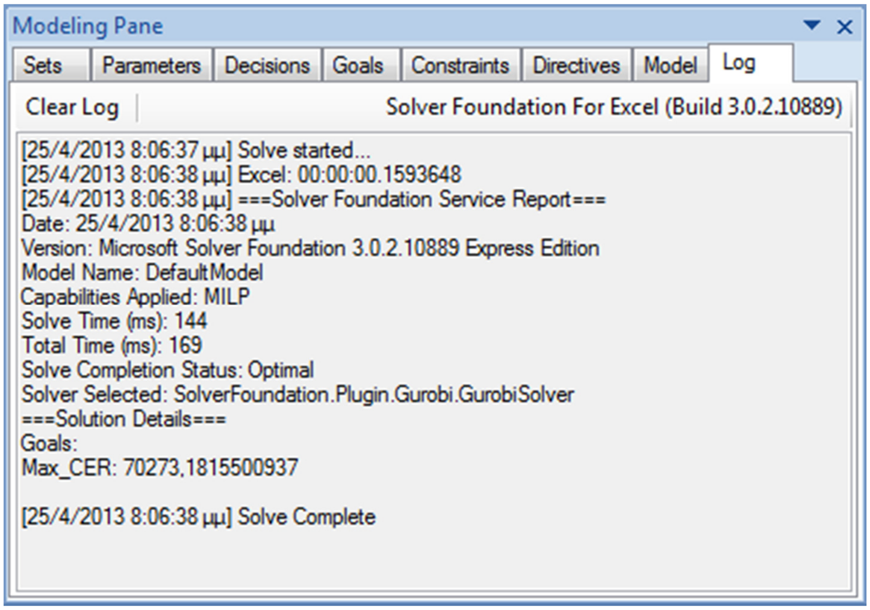
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου αποδίδονται σ' ένα νέο φύλλο εργασίας με τίτλο "Solver Foundation Results" και μερικώς στην καρτέλα "Log" του παράθυρου μοντελοποίησης:

Solver Foundation Results

Name	Value
Solution Type	Optimal
Max_CER	70273,18155
X[1]	0
X[2]	0
X[3]	0
X[4]	0
X[5]	0
X[6]	0
X[7]	0
X[8]	0
X[9]	0
X[10]	0
X[11]	0
X[12]	0
X[13]	1
X[287]	1
X[288]	1
X[289]	1
X[290]	1
X[291]	1
X[292]	1
X[293]	1
X[294]	1
X[295]	1
X[296]	1
X[297]	1
X[298]	1
X[299]	1
X[300]	1
TOTBUDG	1990,46
TOTPROJ	103
PORTF_CER	70273,18155

Sheet1 | Solver Foundation Results | Sheet2

Εικόνα 6.10: Τα αποτελέσματα στο φύλλο εργασίας "Solver Foundation Results"



Εικόνα 6.11: Η αναφορά του πρόσθετου στο Log

6.6 Προσομοίωση Monte Carlo

Μέχρι στιγμής καλύψαμε το πρώτο σκέλος επίλυσης του προβλήματος, της βελτιστοποίησης δηλαδή του μοντέλου με μαθηματικό προγραμματισμό. Προκειμένου να επιλύσουμε το πρόβλημα t φορές, πρέπει να εφαρμόσουμε τη προσομοίωση Monte Carlo, ώστε να ενσωματώσουμε την επαναληπτική διαδικασία για t επιλύσεις του προβλήματος. Δυστυχώς το πρόσθετο ως έχει δεν υποστηρίζει την εξαγωγή πολλαπλών λύσεων, γι' αυτό προχωρήσαμε στην κατασκευή μιας μακροεντολής που θα υποστηρίζει αυτή τη λειτουργία με τη βοήθεια της VBA (Visual Basic for Applications).

6.6.1 Συνθέτοντας τις κατάλληλες μακροεντολές

Το πρόσθετο υποστηρίζει την εκτέλεσή του μέσω VBA με τη χρήση του παρακάτω κώδικα:

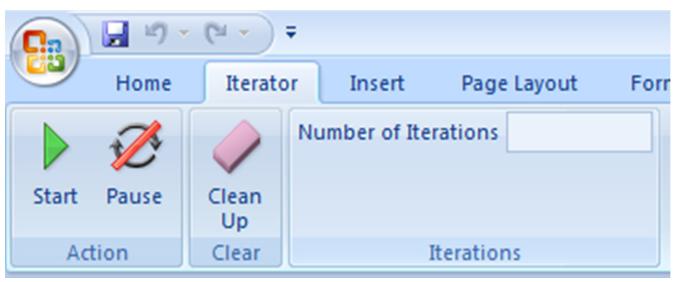
```
Sub CallSolve()

    ' Get the MSFForExcel COM object
    Dim oAddin As COMAddIn
    Dim oCOMFuncs As Object
    Set oAddin = Application.COMAddIns("MicrosoftSolverFoundationForExcel")
    Set oCOMFuncs = oAddin.Object
     ' Solve
    oCOMFuncs.Solve

End Sub
```

Παρόλα αυτά η χρήση επανάληψης στον κώδικα που θα ενσωματώσει το συγκεκριμένο module προκαλεί ασύγχρονη διαδικασία, επιτρέποντας στον υπόλοιπο κώδικα να τρέξει όσες φορές υποδείξουμε, εκτός του συγκεκριμένου υποπρογράμματος που θα τρέξει μια φορά. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα, αντί επαναληπτικής διαδικασίας χρησιμοποιούμε έλεγχο συνθήκης (αντί για for χρησιμοποιούμε if) που θα εκτελείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, δίνοντας έτσι το χρόνο στο πρόσθετο να ολοκληρώσει την επίλυση του προβλήματος. Επιχειρείται δηλαδή όχι ένα μοναδικό τρέξιμο του υποπρογράμματος, αλλά πολλά διαδοχικά τρεξίματα που εξαρτώνται από μια συνθήκη. Το «φρενάρισμα» αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της εντολής “Application.OnTime”. Η προεπιλεγμένη τιμή για κάθε επανάληψη είναι 2 δευτερόλεπτα.

Γύρω απ’ αυτές τις δύο λειτουργίες συνθέσαμε μια σειρά εντολών που χειραγωγούν τα κελιά που περιέχουν τα αποτελέσματα κάθε επανάληψης και δημιουργούν μια λίστα αυτών προς καλύτερη ανάγνωση και επεξεργασία σε ένα νέο φύλλο εργασίας (Sheet2).

6.6.2 Η καρτέλα επανάληψης (Iterator tab)

Για την ευκολότερη και ταχύτερη εκτέλεση των επιθυμητών επαναλήψεων κατασκευάσαμε μια καρτέλα στην κορδέλα του αρχείου Excel που θα καλεί τις μακροεντολές που συνθέσαμε:



Εικόνα 6.12: Η καρτέλα Iterator στην κορδέλα του Excel

Start – Εκκίνηση της προσομοίωσης Monte Carlo. Πριν εκκινήσουμε μια διαδικασία επανάληψης πρέπει να επιλύσουμε μια φορά το μοντέλο μας για να φορτωθούν στη μνήμη οι απαραίτητες βιβλιοθήκες dll, κτλ.

Pause – Διακόπτει τη διαδικασία επανάληψης, η οποία μπορεί να ξαναρχίσει από το σημείο που σταμάτησε πατώντας ξανά το κουμπί Start.

Clean Up – Καθαρίζει το φύλλο εργασίας για νέο σετ επαναλήψεων.

Number of Iterations – Στο κουτί αυτό εισάγουμε τον επιθυμητό αριθμό επαναλήψεων.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα αποτελέσματα που παίρνουμε ενδεικτικά για 5 επαναλήψεις:

	A	B	C	D	E	F
1						
2		**TOTBUDG**	**TOTPROJ**	**PORTF_CER**		**MCiter**
3	1	1990,66	100	70550,80555		5
4	2	1991,26	106	73443,25945		
5	3	1989,86	103	70605,08928		
6	4	1988,26	96	71390,25255		
7	5	1991,66	100	69761,86175		
8						

Εικόνα 6.13: Ενδεικτικά αποτελέσματα της επαναληπτικής διαδικασίας

Τα αποτελέσματα πλέον όπως έχουν ομαδοποιημένα μπορεί να αποτελέσουν στοιχεία ενός δυναμικού γραφήματος ή να επεξεργαστούν με άνεση από κάποια άλλη μακροεντολή που θα τα χειραγωγεί αναλόγως.

Ο κώδικας των μακροεντολών και της καρτέλας επανάληψης βρίσκονται στα αντίστοιχα παραρτήματα (Π.2, Π.3).

7. Συμπεράσματα

Το πρόσθετο του MSF για το Excel αποτελεί αναμφιβόλως ένα πρακτικό εργαλείο για την επίλυση μοντέλων, κυρίως LP, MIP και CSP. Η και κάποιος αρχάριος στη μοντελοποίηση προβλημάτων είναι σε θέση να χρησιμοποιεί το πρόγραμμα με τη γνώση και μόνο κάποιων χαρακτηριστικών λειτουργιών της OML και μια μικρή εξοικείωση στην εισαγωγή δεδομένων σ' ένα φύλλο εργασίας και τη σύνδεσή τους με το μοντέλο.

Φυσικά το συγκεκριμένο πρόσθετο στερείται της δυναμικής και ευελιξίας ενός API, όπως είναι το GAMS, αρκεί όμως μια ματιά στην τελική δομή και σύνταξη ενός μοντέλου και στις δύο περιπτώσεις (βλ. παράρτημα) για να καταλάβει πόσο ευκολοδιάβαστο και επομένως αμεσότερα κατανοητό γίνεται το μοντέλο στο Excel ή πόσο ευκολότερα μπορεί να υποστεί τροποποιήσεις. Από τη στιγμή δηλαδή που το πρόσθετο μπορεί να υποστηρίξει το μοντέλο μας, δεν υπάρχει κάποιος λόγος να αποφύγουμε τη χρήση του. Οι τεχνικές επίλυσης που πιθανότερα να μην υποστηρίζει το πρόσθετο, είναι αυτές στις οποίες μέρη του μοντέλου υφίστανται τροποποιήσεις.

Κατά την προσαρμογή του μοντέλου από το GAMS στο Excel διαπιστώσαμε κατευθείαν τις διευκολύνσεις που μπορεί να μας παρέχει με τις υπάρχουσες συναρτήσεις που ενσωματώνει ή τη δυνατότητα ανάπτυξης μακροεντολών προς περαιτέρω διευκόλυνσή μας ή ακόμη και επέκτασης των δυνατοτήτων του πρόσθετου.

Οι δυνατότητες του πρόσθετου δεν σταματούν στους υπάρχοντες τρόπους επίλυσης ενός μοντέλου που προσφέρει, καθώς υποστηρίζει την ανάπτυξη νέων solvers που θα ικανοποιούν τις ανάγκες μας, που όμως απαιτεί πολυετή γνώση, εμπειρία και εξοικείωση με γλώσσες προγραμματισμού (ειδικά C#) και μοντελοποιήσεις σύνθετων προβλημάτων και ξεφεύγει κατά πολύ από το σκοπό αυτού του εγχειριδίου.

Ελπίζω αυτός ο οδηγός χρήσης του πρόσθετου να φανεί χρήσιμος σ' όλους τους ενδιαφερόμενους στη μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων ή να βοηθήσει όσους δεν έχουν το χρόνο να ασχοληθούν ενδελεχώς με τον τομέα αυτό να επιλύσουν καθημερινά απλά προβλήματα με τη χρήση και μόνο αυτού του πρόσθετου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Amsterdam Optimization Modeling Group LLC, Modeling with Excel+OML, a practical guide, 2009
Microsoft Corporation, Microsoft Solver Foundation Solver Foundation for Excel Primer, 2011
Mavrotas G, Pechak O, Combining Mathematical Programming and Monte Carlo simulation to deal with uncertainty in energy project portfolio selection, 2011
Paragon Decision Technology B.V., AIMMS Optimization Modeling, 2009
Σίσκος Γ., Γραμμικός Προγραμματισμός, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 1999

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π.1: Μοντελοποίηση του προβλήματος στο GAMS

```
$TITLE project selection under uncertainty
$eolcom //
$ontext
Project selection problem
Data from CDM pipeline
$offtext

SETS
I      projects /1*300/

SWIND(I) /1*43/
LWIND(I) /44*110/
SHYDR(I) /111*155/
LHYDR(I) /156*204/
BIOMS(I) /205*235/
EEPGN(I) /236*255/
LANDF(I) /256*273/
CH4AV(I) /274*300/
GOLDST(I)
/23,30,36,51,52,57,58,59,60,62,68,70,72,73,74,76,82,83,87,88,89,90,91,92,93,95,96,97,98,99,100,101,
104,106,107,110,154,155,188,204,219,227,228,229,231,232,233,234,250,272,273,285,286,288,289,29
0,291,294,296,297,298,299,300/

CHINA(I)
/4,8,24,31,37,46,47,49,50,51,52,54,57,58,59,60,62,63,64,65,66,68,70,71,72,73,74,75,77,78,79,80,81,82
,83,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,103,104,105,106,107,108,109,110,117,119,121,12
2,123,129,131,132,134,135,136,137,139,140,141,143,145,147,148,151,152,160,163,166,167,168,169,1
71,172,174,178,179,181,182,183,185,186,188,190,191,193,194,196,197,199,201,202,203,221,232,240,
242,243,247,249,250,251,253,254,255,257,262,267,269,272,273,281,291,294,300/
INDIA(I)
/1,2,3,5,6,9,10,11,12,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,32,33,34,35,36,38,39,40,41,42,4
3,44,61,85,102,111,112,114,115,120,125,126,133,150,153,162,164,173,176,184,205,206,207,211,212,
213,219,220,224,227,228,229,231,233,234,237,238,239,244,246,252,268,274,275/
BRASIL(I)   /53,113,116,130,142,170,175,180,189,236,256,263/
SKOREA(I)   /7,86,118,146,198/
ECUAD(I)   /13,156,161/
PHILL(I)   /45,223,241,295/
MEXICO(I)   /48,55,67,69,159,261,265,266,284/
EGYPT(I)   /56,245/
CHILE(I)   /76,127,144,157,177,192,209,214/
VIETN(I)   /84,149,155,195,200,204/
PERU(I)   /124,128,138,158,165,187/
HOND(I)   /154,292/
MALAY(I)   /208,210,215,218,230,258,276,277,282,293/
INDONES(I)   /216,217,260,286,288,289/
SAFRIC(I)   /222,259,264,280/
THAI(I)   /225,226,248,270,278,279,283,285,287,290,296,297,298,299/
ARGEN(I)   /235,271/
```

```
T    type of project - technology /sw, lw, sh, lh, bi, eep, ldf, mav/
;

alias (I,I2);

parameter budg(I) budget for project(I) in million euros
/
1       8.4
2       3.5
3       4.4
4       14.0
5       7.7
6       11.8
7       37.0
8       22.8
9       4.9
10       12.1
11       13.0
12       4.0
13       10.0
14       4.5
15       3.8
16       5.1
17       9.0
18       14.9
19       7.2
20       14.4
21       2.1
22       5.5
23       2.3
24       20.9
25       14.9
26       11.4
27       12.2
28       4.4
29       5.0
30       13.7
31       13.7
32       4.5
33       1.5
34       3.2
35       18.5
36       4.46
37       19.5
38       8.4
39       21.4
40       2.2
41       13.3
42       2.2
43       18.4
44       21.3
```

45	**51.2**
46	**59.9**
47	**106.9**
48	**205.0**
49	**34.6**
50	**29.8**
51	**62.7**
52	**60.1**
53	**343.7**
54	**67.7**
55	**395.4**
56	**120.6**
57	**63.3**
58	**64.0**
59	**54.0**
60	**51.8**
61	**34.8**
62	**55.1**
63	**34.3**
64	**58.0**
65	**66.5**
66	**29.6**
67	**367.0**
68	**54.1**
69	**369.3**
70	**28.2**
71	**178.3**
72	**64.3**
73	**241.5**
74	**49.7**
75	**60.4**
76	**108.5**
77	**28.9**
78	**59.6**
79	**67.4**
80	**71.0**
81	**43.3**
82	**60.2**
83	**59.9**
84	**49.6**
85	**68.7**
86	**88.6**
87	**56.3**
88	**63.5**
89	**61.1**
90	**59.4**
91	**52.3**
92	**60.4**
93	**57.6**
94	**346.4**
95	**63.9**
96	**62.3**

97	306.4
98	62.7
99	68.2
100	68.3
101	65.3
102	26.3
103	64.7
104	28.1
105	566.7
106	66.3
107	234.8
108	59.8
109	59.3
110	113.0
111	6.0
112	10.5
113	1.2
114	3.3
115	4.1
116	22.5
117	6.2
118	6.3
119	6.0
120	3.4
121	8.6
122	7.6
123	7.8
124	11.8
125	3.1
126	2.7
127	5.1
128	9.1
129	6.2
130	14.5
131	3.5
132	16.5
133	7.9
134	6.0
135	4.4
136	5.3
137	7.2
138	17.6
139	11.5
140	12.9
141	9.7
142	29.7
143	10.1
144	1.5
145	12.4
146	27.5
147	10.8
148	11.3

149	**6.3**
150	**8.2**
151	**8.2**
152	**4.8**
153	**9.7**
154	**8.0**
155	**3.3**
156	**33.5**
157	**225.0**
158	**50.0**
159	**45.0**
160	**45.1**
161	**18.3**
162	**19.3**
163	**76.4**
164	**38.8**
165	**93.4**
166	**12.3**
167	**59.5**
168	**51.1**
169	**109.0**
170	**11.0**
171	**13.1**
172	**92.0**
173	**23.1**
174	**16.6**
175	**38.5**
176	**23.0**
177	**79.6**
178	**32.7**
179	**71.4**
180	**6.2**
181	**14.7**
182	**15.3**
183	**28.9**
184	**147.3**
185	**24.3**
186	**116.8**
187	**178.4**
188	**14.2**
189	**23.5**
190	**21.8**
191	**29.8**
192	**29.5**
193	**67.5**
194	**58.8**
195	**19.4**
196	**16.2**
197	**76.3**
198	**84.1**
199	**25.1**
200	**19.6**

201	**22.7**
202	**73.2**
203	**142.4**
204	**21.1**
205	**7.8**
206	**6.1**
207	**6.1**
208	**2.9**
209	**38.3**
210	**10.7**
211	**5.9**
212	**4.8**
213	**2.8**
214	**2.8**
215	**2.9**
216	**8.0**
217	**8.0**
218	**4.2**
219	**6.1**
220	**2.3**
221	**34.1**
222	**3.8**
223	**11.0**
224	**9.2**
225	**49.0**
226	**46.8**
227	**7.4**
228	**7.2**
229	**4.1**
230	**6.6**
231	**8.7**
232	**38.9**
233	**6.6**
234	**10.7**
235	**25.8**
236	**35.5**
237	**12.3**
238	**4.3**
239	**20.9**
240	**11.0**
241	**31.8**
242	**128.4**
243	**60.5**
244	**18.4**
245	**14.6**
246	**13.1**
247	**42.0**
248	**25.1**
249	**11.1**
250	**11.9**
251	**8.9**
252	**12.9**

```
253     96.6
254     26.3
255     6.9
256     14.0
257     4.6
258     4.1
259     12.2
260     27.4
261     3.8
262     6.1
263     0.9
264     12.2
265     6.6
266     3.0
267     4.1
268     32.7
269     3.7
270     4.2
271     16.7
272     2.2
273     6.3
274     7.1
275     1.6
276     2.6
277     4.8
278     7.6
279     2.0
280     2.1
281     10.3
282     1.8
283     2.9
284     1.3
285     3.5
286     3.0
287     2.2
288     3.0
289     3.0
290     4.6
291     4.1
292     2.3
293     3.6
294     2.9
295     10.1
296     5.1
297     1.6
298     3.9
299     2.6
300     4.9
/

parameter expcer(I) expected cers for project(I)
/
```

1	78
2	69
3	76
4	143
5	153
6	226
7	202
8	204
9	72
10	240
11	205
12	58
13	20
14	81
15	48
16	90
17	147
18	203
19	116
20	231
21	27
22	73
23	38
24	222
25	196
26	206
27	144
28	70
29	60
30	148
31	128
32	64
33	32
34	52
35	241
36	55
37	217
38	125
39	304
40	177
41	161
42	68
43	218
44	422
45	398
46	698
47	1395
48	2912
49	656
50	296
51	783
52	783

53	1038
54	879
55	5996
56	1740
57	762
58	841
59	742
60	688
61	658
62	589
63	302
64	856
65	970
66	432
67	2277
68	658
69	2511
70	357
71	635
72	843
73	3412
74	727
75	994
76	191
77	374
78	883
79	705
80	821
81	461
82	763
83	903
84	406
85	913
86	597
87	735
88	831
89	904
90	744
91	589
92	947
93	655
94	6249
95	729
96	769
97	5112
98	886
99	905
100	802
101	960
102	231
103	782
104	245

105	6197
106	912
107	3303
108	805
109	726
110	1573
111	115
112	178
113	294
114	95
115	393
116	319
117	139
118	60
119	149
120	64
121	174
122	231
123	321
124	127
125	128
126	125
127	74
128	154
129	144
130	281
131	209
132	281
133	186
134	178
135	115
136	361
137	373
138	294
139	314
140	273
141	331
142	168
143	211
144	31
145	408
146	96
147	396
148	307
149	95
150	178
151	243
152	176
153	219
154	168
155	48
156	988

157	3343
158	1078
159	460
160	944
161	463
162	424
163	1922
164	1192
165	1746
166	254
167	1862
168	2085
169	2164
170	353
171	358
172	2240
173	701
174	360
175	226
176	623
177	1205
178	528
179	2442
180	497
181	298
182	551
183	685
184	1315
185	502
186	1576
187	2757
188	364
189	144
190	665
191	400
192	371
193	1544
194	1940
195	277
196	603
197	1564
198	209
199	931
200	303
201	565
202	1248
203	2294
204	252
205	314
206	639
207	211
208	228

209	720
210	378
211	439
212	313
213	215
214	262
215	1524
216	561
217	463
218	62
219	259
220	215
221	1250
222	391
223	264
224	570
225	1025
226	931
227	283
228	207
229	359
230	279
231	299
232	992
233	256
234	351
235	318
236	900
237	784
238	523
239	1168
240	549
241	617
242	6655
243	1323
244	1130
245	767
246	181
247	2714
248	464
249	671
250	559
251	388
252	716
253	4282
254	1129
255	350
256	5258
257	2006
258	578
259	482
260	864

```
261        1193
262        913
263        298
264        2399
265        1577
266        572
267        713
268        1119
269        1029
270        1186
271        2603
272        102
273        1436
274        320
275        313
276        451
277        536
278        3108
279        236
280        229
281        664
282        790
283        311
284        84
285        292
286        238
287        167
288        365
289        350
290        370
291        250
292        211
293        461
294        597
295        238
296        363
297        98
298        229
299        123
300        606
/

parameter avcer(T) average issuance success fot technology T
/
sw       0.85
lw       0.90
sh       0.84
lh       0.86
bi       0.84
eep       0.77
ldf      0.52
mav       0.61
```

```
/

parameter sdcer(T) standard deviation of issuance success fot technology T
/
sw       0.200
lw       0.250
sh       0.490
lh       0.280
bi       0.349
eep       0.247
ldf       0.358
mav       0.375
/
parameter rcer(I) random cers for project(I)

scalar
elapsed_time elapsed time for payoff and e-constraint
start start time
finish finish time
iter  counter for iterations
r auxiliary parameter
MCiter number of Monte Carlo iterations /100/
maxbudg  maximum budget (million euros) /1000/

;

BINARY VARIABLES
X(I)    binary variable indicating if project I is selected or not

Positive variables
TOTBUDG total budget (million euros)
TOTPROJ total projects;

FREE VARIABLES
PORTF_CER     total CER from portfolio;

EQUATIONS
EQ_TOTBUDG   equation for total budget
EQ_TOTPROJ   equation for total projects
EQ_GS       constraint for GoldenStandard condition
EQ_GEO1      constraint for geographical condition 1
EQ_GEO2      constraint for geographical condition 2
EQ_GEO3      constraint for geographical condition 3
EQ_TECH1     constraint for technology condition 1
EQ_TECH2     constraint for technology condition 2
EQ_TECH3     constraint for technology condition 3
EQ_TECH4     constraint for technology condition 3
EQ_TECH5     constraint for technology condition 3
EQ_TECH6     constraint for technology condition 3

EQ_OBJ      objective function --> maximization of portfolio's CERs
```

```
;

EQ_TOTBUDG.. sum(I, budg(I)*X(I))=e= TOTBUDG;
EQ_TOTPROJ.. sum(I, X(I)) =e= TOTPROJ;
EQ_GS..      sum(GOLDST(I),X(I)) =g= 0.3*TOTPROJ ;
EQ_GEO1..    sum(CHINA(I),budg(I)*X(I)) =l= 0.4*TOTBUDG;
EQ_GEO2..    sum(INDIA(I),budg(I)*X(I)) =l= 0.3*TOTBUDG;
EQ_GEO3..
sum(BRASIL(I),X(I))+sum(ECUAD(I),X(I))+sum(MEXICO(I),X(I))+sum(CHILE(I),X(I))
          +sum(PERU(I),X(I))+sum(HOND(I),X(I))+sum(ARGEN(I),X(I))=g= 0.3*TOTPROJ;
EQ_TECH1..    sum(SWIND(I),budg(I)*X(I))+    sum(LWIND(I),budg(I)*X(I))    =l=
0.5*TOTBUDG;
EQ_TECH2..    sum(LWIND(I),budg(I)*X(I))+    sum(LHYDR(I),budg(I)*X(I))    =l=
0.4*TOTBUDG;
EQ_TECH3..   sum(BIOMS(I),budg(I)*X(I)) =g= 0.05*TOTBUDG;
EQ_TECH4..   sum(EEPGN(I),budg(I)*X(I)) =g= 0.05*TOTBUDG;
EQ_TECH5..   sum(LANDF(I),budg(I)*X(I)) =g= 0.05*TOTBUDG;
EQ_TECH6..   sum(CH4AV(I),budg(I)*X(I)) =g= 0.05*TOTBUDG;

EQ_OBJ..  sum(I, rcer(I)*X(I))=e= PORTF_CER;

TOTBUDG.up = maxbudg;

MODEL CAIE_40_model /ALL/ ;
OPTION OPTCR = 0;
option seed=1513;

FILE cdmfile /c:\gams\pdd_results_1000.txt/ ;
cdmfile.pw=2000;
put cdmfile ;

start=jnow;

for(iter=1 to MCiter,
* random generation of project scores from normal distribution
  loop(swind(I), rcer(I)=expcer(I)*normal(avcer('sw'),sdcer('sw')));
  loop(lwind(I), rcer(I)=expcer(I)*normal(avcer('lw'),sdcer('lw')));
  loop(shydr(I), rcer(I)=expcer(I)*normal(avcer('sh'),sdcer('sh')));
  loop(lhydr(I), rcer(I)=expcer(I)*normal(avcer('lh'),sdcer('lh')));
  loop(bioms(I), rcer(I)=expcer(I)*normal(avcer('bi'),sdcer('bi')));
  loop(eepgn(I), rcer(I)=expcer(I)*normal(avcer('eep'),sdcer('eep')));
  loop(landf(I), rcer(I)=expcer(I)*normal(avcer('ldf'),sdcer('ldf')));
  loop(ch4av(I), rcer(I)=expcer(I)*normal(avcer('mav'),sdcer('mav')));

   SOLVE CAIE_40_model using MIP maximizing PORTF_CER;
   if (CAIE_40_model.modelstat<>1,
       put iter:6:0, ' INFEASIBLE'/;
   else
       put iter:6:0;
*    put g2:4:0
       put PORTF_CER.L:12:2
       put TOTPROJ.L:12:0;
```

```
        put TOTBUDG.L:12:2
        loop(I, put X.L(I):3:0);
        put /;
       );
   );

finish=jnow;
elapsed_time=(finish-start)*86400;
put cdmfile 'Elapsed time: ',elapsed_time:12:2, ' seconds' / ;
putclose cdmfile ;
*$offtext
```

Π.2: Οι μακροεντολές πίσω από την καρτέλα "Iterator"

```
Public Const cRunIntervalSeconds = 2
Public RibbonTextBox As Integer
Public nextTime As Double

Sub SetTextValue(control As IRibbonControl, TotIter As Integer)
    RibbonTextBox = TotIter
End Sub

Sub Startup()

   Dim PctDone As Double
   Dim Mciter As Integer

   Mciter = Worksheets("Sheet2").Range("F3")
   If Mciter < RibbonTextBox Then

      nextTime = Now + TimeSerial(0, 0, cRunIntervalSeconds)
      Application.OnTime EarliestTime:=nextTime, Procedure:="Startup", _
      Schedule:=True
      Sheets("Solver Foundation Results").Select
      Range("C305:C307").Select
      Selection.Copy

      Sheets("Sheet2").Select
      Cells(Rows.Count, 2).End(xlUp).Offset(1, 0).Select
      Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, _
      Transpose:=True
      ActiveCell.Offset(0, -1).Select
      ActiveCell.Value = Mciter + 1
      ActiveCell.Offset(1, 1).Select
      Call CallSolve
      Mciter = Mciter + 1
      Application.Range("F3").Value = Mciter
      PctDone = (Mciter / RibbonTextBox)
      Call UpdateProgress(PctDone)

   Else

      Unload UserForm1
      MsgBox Mciter & "  Iterations Completed Successfully!", vbOKOnly, "Complete"

   End If

End Sub

Sub StopIt(control As IRibbonControl)
   Application.OnTime EarliestTime:=nextTime, Procedure:="Startup", _
   Schedule:=False
   MsgBox "Application Paused!", vbOKOnly, "Pause"
End Sub
```

```
Sub Clear(control As IRibbonControl)

   Sheets("Sheet2").Select
   Cells.Select
   Selection.ClearContents
   Sheets("Sheet1").Select
   Range("L24:L26").Select
   Selection.Copy
   Sheets("Sheet2").Select
   Range("B2").Select
   Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, _
   Operation:=xlNone, _
   SkipBlanks:=False, _
   Transpose:=True
   Sheets("Sheet2").Range("F2").Value = "MCiter"
   Range("F3").Value = 0
   Range("B3").Select

End Sub

Sub CallSolve()

   ' Get the MSFForExcel COM object
   Dim oAddin As COMAddIn
   Dim oCOMFuncs As Object
   Set oAddin = Application.COMAddIns("MicrosoftSolverFoundationForExcel")
   Set oCOMFuncs = oAddin.Object

   ' Solve
   oCOMFuncs.Solve

End Sub

Sub UpdateProgress(Pct)
   With UserForm1
   .FrameProgress.Caption = Format(Pct, "0%")
   .LabelProgress.Width = Pct * (.FrameProgress.Width - 10)
   .Repaint
   End With
End Sub

Sub DisplayProgBar(control As IRibbonControl)

   UserForm1.Show

End Sub

Private Sub CommandButton1_Click()
   Unload UserForm1
End Sub
Private Sub UserForm_Activate()
```

```
    Call Startup
End Sub
```

Π.3: Ο κώδικας της καρτέλας "Iterator"

```
<customUI
xmlns="http://schemas.microsoft.com/office/2006/01/customui">

  <ribbon>
    <tabs>
      <tab id="MyCustomTab" label="Iterator"
insertAfterMso="TabHome">
        <group id="customGroup1" label="Action">
          <button id="customButton1" label="Start" size="large"
onAction="DisplayProgbar" imageMso="MacroPlay" />
          <button id="customButton2" label="Pause" size="large"
onAction="StopIt" imageMso="SkipOccurrence" />
        </group>
        <group id="customGroup2" label="Clear">
          <button id="customButton3" label="Clean Up" size="large"
onAction="Clear" imageMso="InkEraseMode" />
        </group>
        <group id="customGroup3" label="Iterations">
          <editBox id="MyEditBox" label="Number of Iterations"
onChange="SetTextValue"/>
        </group>
      </tab>
    </tabs>
  </ribbon>

</customUI>
```