

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Χρήση μεικτού ακέрайου γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με διεΐσδυση ενέργειας παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές”

Αλέξανδρος Σπανός

Επιβλέπων καθηγητής: Αθανάσιος Τόλης

ΑΘΗΝΑ 2019

Ευχαριστήριο Σημείωμα

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Τόλη για την ανάθεση του θέματος και την υποστήριξη του, καθώς και τον Βασίλη Τσαλαβούτη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που προσέφερε σε όλη την διάρκεια της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρέχουν όλα τα χρόνια της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Έποψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το πρόβλημα ένταξης μονάδων (Unit Commitment) και περιέχει την επίλυση του με ένα μοντέλο μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming). Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab, με χρήση της Problem Based έκφρασης της εσωτερικής συνάρτησης `intlinprog`.

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων εφαρμόζεται σε 3 βασικά σενάρια. Αρχικά, επιλύεται ένα σύστημα με χρήση τμηματικής γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής (piecewise linear production cost) και μιας βηματικής (stairwise) συνάρτησης που εκφράζει το χρονικά εξαρτώμενο κόστος εκκίνησης, για διάφορες τιμές του πλήθους των μονάδων παραγωγής. Προσδιορίζεται η κατάσταση λειτουργίας των μονάδων σε ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα και η ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα για κάθε περίοδο. Ζητούμενο στην όλη διαδικασία αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, το οποίο ελέγχεται και προς την εξάρτηση του με το πλήθος των τμημάτων που χρησιμοποιούνται για την παραπάνω γραμμικοποίηση.

Στην συνέχεια, επιλύεται το ίδιο πρόβλημα με ενσωμάτωση των ορίων κλίσης (ramp rates) στο μοντέλο και παρατηρείται η διαφοροποίηση στην τιμή του συνολικού κόστους και του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται.

Για τις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα από εργασίες που βρέθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία και χρησιμοποιούν παρόμοια δεδομένα (Case Study), για να ελεγχθούν τα αντίστοιχα της παρούσας εργασίας.

Τέλος, παρουσιάζεται μια νεοτερμινιστική προσέγγιση διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα και παρατηρείται πως διαμορφώνεται η ζήτηση που καλούνται να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες για διάφορα επίπεδα διείσδυσης, καθώς και ο αντίστοιχος προγραμματισμός παραγωγής των μονάδων και το συνολικό κόστος, το οποίο συγκρίνεται με το αντίστοιχο της καθαρά συμβατικής παραγωγής.

Δομή της εργασίας

Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματεύεται το γενικό θέμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο ελληνικό αλλά και παγκόσμιο σύστημα ενέργειας. Παρουσιάζεται μια έρευνα για την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο κρατών με έμφαση στο ελληνικό στοιχείο αλλά και για τις επικρατέστερες πηγές που χρησιμοποιούνται στο στάδιο παραγωγής. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως κλάδο με μεγάλη ανάπτυξη και ενδιαφέρον ως προς την προστασία του περιβάλλοντος. Στην συνέχεια, αναπτύσσεται το πρόβλημα ένταξης μονάδων που αποτελεί και το κεντρικό θέμα της εργασίας, ως προς την χρησιμότητα του, το μοντέλο που ακολουθείται για την έκφραση του και τους διάφορους περιορισμούς που το διέπουν και παρατίθενται διάφορες μέθοδοι επίλυσης από την διεθνή βιβλιογραφία. Το κεφάλαιο κλείνει με την ανάπτυξη της θεωρίας του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) που αποτελεί την μέθοδο μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία και γίνεται βιβλιογραφική αναδρομή σε περιπτώσεις αντιμετώπισης του προβλήματος ένταξης μονάδων με MILP.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση με MILP, ορίζοντας πλήρως τις μεταβλητές, τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση που εμπλέκονται. Επίσης, αναλύεται η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εξετάζεται η επίδραση της ενέργειας αυτής στην συνολική ζήτηση που καλούνται να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες.

Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της Matlab με χρήση της εσωτερικής συνάρτησης `intlinprog`, που διατίθεται για την βελτιστοποίηση προβλημάτων μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Αναλύονται εκτενώς τα στάδια που απαρτίζουν την διαδικασία επίλυσης της `intlinprog` και περιγράφεται η δημιουργία κατάλληλου αλγορίθμου με βάση το μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου. Το πρόβλημα ένταξης μονάδων επιλύεται για τρία βασικά σενάρια, χωρίς όρια κλίσης, με ενσωμάτωση των ορίων κλίσης και με διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιούνται αντιπροσωπευτικά δεδομένα από την διεθνή βιβλιογραφία με σκοπό τον έλεγχο του προγράμματος.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα για όλα τα σενάρια με εφαρμογές για διάφορες τιμές του πλήθους των μονάδων δίνοντας έμφαση στο συνολικό κόστος, που αποτελεί και το ζητούμενο ελαχιστοποίησης και το πως επηρεάζεται από τις αλλαγές που εμφανίζονται στις διάφορες εκδοχές του προβλήματος. Για κάθε περίπτωση, απεικονίζεται το πρόγραμμα των μονάδων, η ισχύ που καλούνται να παράξουν σε κάθε χρονική περίοδο αλλά και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται μαζί με το σχετικό σφάλμα το οποίο παρουσιάζεται από τον αλγόριθμο επίλυσης. Στην συνέχεια, αναλύονται τα γενικά συμπεράσματα της μελέτη, εμβαθύνοντας στη σημασία του προβλήματος ένταξης μονάδων, στον σχολιασμό των αποτελεσμάτων και στο υπολογιστικό μοντέλο. Αναφέρεται η ανάπτυξη του επιλύτη `intlinprog`, αλλά

και κάποια μειονεκτήματα συγκριτικά με αντίστοιχους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία σε επαγγελματικό - ανταγωνιστικό επίπεδο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο υπάρχει ο επίλογος της εργασίας με μια μικρή σύνοψη των σημαντικότερων σημείων που παρουσιάστηκαν και στο έκτο αναφέρεται επιγραμματικά ο κατάλογος βιβλιογραφικών αναφορών.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	10
1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	10
1.1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	10
1.1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.....	14
1.1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	17
1.1.3.1 Εισαγωγή στις ΑΠΕ.....	17
1.1.3.2 Διείσδυση των ΑΠΕ στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα	18
1.2 Πρόβλημα ένταξης μονάδων.....	21
1.2.1 Εισαγωγή.....	21
1.2.2 Επίλυση Προβλήματος Ένταξης Μονάδων	21
1.2.3 Περιορισμοί του Προβλήματος Ένταξης Μονάδων.....	22
1.2.4 Μέθοδοι επίλυσης του Προβλήματος Ένταξης Μονάδων	24
1.2.4.1 Ντετερμινιστικές τεχνικές	24
1.2.4.2 Στοχαστικές τεχνικές - Εξελικτικοί αλγόριθμοι	26
1.2.4.3 Υβριδικοί Αλγόριθμοι (Hybrid Algorithms)	29
1.3 Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (Mixed Integer Linear Programming).....	31
1.3.1 Εισαγωγή.....	31
1.3.2 Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming)	31
1.3.3.1 Αναδρομή σε μεθόδους επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με Μεικτό Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (Mixed Integer Linear Programming solution of Unit Commitment Problem)	34
1.3.3.2 Πλεονεκτήματα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων	37
2. Μαθηματικό μοντέλο	38
2.1 Εισαγωγή.....	38
2.2 Συμβολισμός βασικών μεγεθών	38
2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ένταξης μονάδων (UCP) με μεικτό ακέραιο προγραμματισμό (MILP)	41
2.3.2 Περιορισμοί.....	45
2.4 Μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω MILP.....	48
3. Υπολογιστικό μοντέλο	50
3.1 Εισαγωγή.....	50
3.2 Επίλυση μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με την χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος MATLAB	50
3.3 Επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων χωρίς όρια κλίσης (Ramp Rates).....	55
3.3.1 Δεδομένα πρότυπου συστήματος 10 μονάδων (Case Study).....	55
3.3.2 Επίλυση συστήματος 10 μονάδων.....	57
3.3.3 Επίλυση συστήματος 20 και 40 μονάδων	62
3.4 Επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με χρήση ορίων κλίσης (Ramp Rates).....	63
3.4.1 Υπολογιστική προσαρμογή των ορίων κλίσης (Ramp Rates).....	63
3.4.2 Εφαρμογή στα συστήματα 10 και 20 μονάδων	63

3.5 Επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	64
4. Αποτελέσματα και συμπεράσματα	65
4.1 Πρόβλημα ένταξης μονάδων χωρίς όρια κλίσης (ramp rates).....	65
4.1.1 Σύστημα 10 μονάδων παραγωγής	65
4.1.2 Σύστημα 20 μονάδων παραγωγής	68
4.1.3 Σύστημα 40 μονάδων παραγωγής	70
4.1.4 Συγκριτικά αποτελέσματα με διάφορες λύσεις του προβλήματος ένταξης μονάδων	74
4.2 Επίδραση του πλήθους των διαστημάτων (segments) της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής (piecewise linear production cost function) στο συνολικό γραμμικό κόστος.....	75
4.3 Πρόβλημα ένταξης μονάδων με όρια κλίσης (ramp rates)	76
4.3.1 Αποτελέσματα συστήματος 10 μονάδων	76
4.3.2 Σύστημα 20 μονάδων παραγωγής	77
4.3.3 Συγκριτικά αποτελέσματα για διάφορους τρόπους επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με όρια κλίσης (ramp rates).....	79
4.4 Πρόβλημα ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ...	80
4.4.1 Αποτελέσματα προβλήματος ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	80
4.4.2 Σύγκριση συνολικού κόστους με διείσδυση ΑΠΕ και παραγωγής με συμβατικές μονάδες.....	84
4.5 Συμπεράσματα	86
4.5.1 Συμπεράσματα για το πρόβλημα ένταξης μονάδων	86
4.5.2 Συμπεράσματα για τα αποτελέσματα.....	86
4.5.3 Συμπεράσματα για το υπολογιστικό μοντέλο	87
5. Επίλογος.....	89
6. Κατάλογος βιβλιογραφικών αναφορών.....	90

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1-1: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από κάθε πηγή, κατανάλωση από κάθε τομέα για την Ελλάδα, (2015/2016).....	11
Σχήμα 1-2: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από κάθε πηγή για τις χώρες του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, 2016	12
Σχήμα 1-3: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από κάθε πηγή για την Ελλάδα, 1973 - 2016	12
Σχήμα 1-4: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε τομέα για την Ελλάδα, 1973 – 2016	13
Σχήμα 1-5: Συνολική παραγωγή μεικτής ηλεκτρικής ενέργειας, 1974 – 2016.....	14
Σχήμα 1-6: Παγκόσμια παραγωγή μεικτής ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε πηγή, 2016	15
Σχήμα 1-7: Παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε τομέα, 1974 – 2016.....	16
Σχήμα 1-8: Δέκα χώρες με την μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, 2016	16
Σχήμα 1-9: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ποσοστό για κάθε πηγή στην Ελλάδα, 1973-2016	19

Σχήμα 1-10: Εγκατεστημένη ισχύς υδροηλεκτρικής, αιολικής και ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα, 2000-2015	20
Σχήμα 1-11: Παράδειγμα επίλυσης προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού	32
Σχήμα 2-1: Τμηματική γραμμική συνάρτηση κόστους παραγωγής (piecewise linear production cost function).....	43
Σχήμα 3-1: Περιγραφή του αλγορίθμου intlinprog.....	51
Σχήμα 4-1: Παραγόμενη ισχύς, στόχος παραγωγής με απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας και μέγιστη παραγωγική ικανότητα συστήματος συναρτήσει του χρόνου για σύστημα 10 μονάδων	66
Σχήμα 4-2: Παραγόμενη ισχύς, στόχος παραγωγής με απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας και μέγιστη παραγωγική ικανότητα συστήματος συναρτήσει του χρόνου για σύστημα 20 μονάδων	68
Σχήμα 4-3: Παραγόμενη ισχύς, στόχος παραγωγής με απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας και μέγιστη παραγωγική ικανότητα συστήματος συναρτήσει του χρόνου για σύστημα 40 μονάδων	71
Σχήμα 4-4: Ζήτηση που καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες ύστερα από την διείσδυση των ΑΠΕ	80
Σχήμα 4-5: Συνολικό κόστος ανά περίοδο συναρτήσει του συντελεστή βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ	85

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1-1: Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς από κάθε πηγή για την Ελλάδα, 2000 – 2015 (MW).....	13
Πίνακας 2-1: Σταθερές μαθηματικού μοντέλου	39
Πίνακας 2-2: Μεταβλητές μαθηματικού μοντέλου	41
Πίνακας 2-3: Μεταβλητές μαθηματικού μοντέλου με διείσδυση ΑΠΕ.....	48
Πίνακας 3-1: Εντολές ορισμού μεταβλητών και προβλήματος συνάρτησης intlinprog	54
Πίνακας 3-2: Εντολές ορισμού εκφράσεων και περιορισμών συνάρτησης intlinprog	54
Πίνακας 3-3: Εντολές επίλυσης και ανάλυσης δεδομένων συνάρτησης intlinprog	54
Πίνακας 3-4: Αντικείμενα συνάρτησης intlinprog.....	55
Πίνακας 3-5: Δεδομένα μονάδων συστήματος I.....	55
Πίνακας 3-6: Δεδομένα μονάδων συστήματος II.....	56
Πίνακας 3-7: Προβλεπόμενη ζήτηση φορτίου.....	56
Πίνακας 3-8: Initial states των μονάδων παραγωγής.....	59
Πίνακας 3-9: Έξοδοι της μεταβλητής exitflag.....	61
Πίνακας 3-10: Δεδομένα ορίων κλίσης των μονάδων παραγωγής.....	64
Πίνακας 4-1: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής .67	

Πίνακας 4-2: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής (MW)	67
Πίνακας 4-3: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 20 μονάδων.....	69
Πίνακας 4-4: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 20 μονάδων (MW)	70
Πίνακας 4-5: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 40 μονάδων.....	72
Πίνακας 4-6: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 40 μονάδων (MW)	73
Πίνακας 4-7: Βέλτιστες λύσεις με χρήση μεικτού ακέραιου προγραμματισμού και επίλυση μέσω CPLEX.....	74
Πίνακας 4-8: Προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με διάφορες μεθόδους για συστήματα 10, 20 και 40 μονάδων	74
Πίνακας 4-9: Γραμμικό συνολικό κόστος παραγωγής συναρτήσει του αριθμού των τμημάτων (segments) της γραμμικής προσέγγισης	75
Πίνακας 4-10: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με όρια κλίσης (ramp rates)	76
Πίνακας 4-11: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με όρια κλίσης (ramp rates) (MW).....	76
Πίνακας 4-12: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 20 μονάδων παραγωγής με όρια κλίσης (ramp rates)	77
Πίνακας 4-13: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 20 μονάδων παραγωγής με όρια κλίσης (ramp rates) (MW).....	78
Πίνακας 4-14: Προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με όρια κλίσης (ramp rates) με διάφορες μεθόδους για συστήματα 10 και 20 μονάδων.....	79
Πίνακας 4-15: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ, $FD = 0,5$	81
Πίνακας 4-16: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ (MW), $FD = 0,5$	81
Πίνακας 4-17: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ, $FD = 1,0$	82
Πίνακας 4-18: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ (MW), $FD = 1,0$	82
Πίνακας 4-19: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ, $FD = 1,5$	83
Πίνακας 4-20: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ (MW), $FD = 1,5$	83
Πίνακας 4-21: Σύγκριση συνολικού κόστους παραγωγής με συμβατικές μονάδες και διείσδυση ΑΠΕ για το σύστημα 10 μονάδων	84

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της εκμετάλλευσης διάφορων πρωτογενών πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τον τόπο παραγωγής καθώς επηρεάζονται άμεσα από την τοπολογία, την νομοθεσία, τους διαθέσιμους πόρους παραγωγής καθώς και από διάφορες κλιματολογικές ιδιαιτερότητες. Οι πηγές παραγωγής ενέργειας διακρίνονται στις δύο βασικές κατηγορίες των συμβατικών και των ανανεώσιμων πηγών (ΑΠΕ). Οι πρώτες βασίζονται κυρίως σε ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας (λιθάνθρακας και λιγνίτης), το φυσικό αέριο και η πυρηνική ενέργεια. Αντίστοιχα οι ΑΠΕ, χρησιμοποιούν φυσικές ανεξάντλητες πηγές όπως ο άνεμος, ο ήλιος και το νερό και δεν καταναλώνουν την πεπερασμένη ποσότητα των ενεργειακών ορυκτών αποθεμάτων.

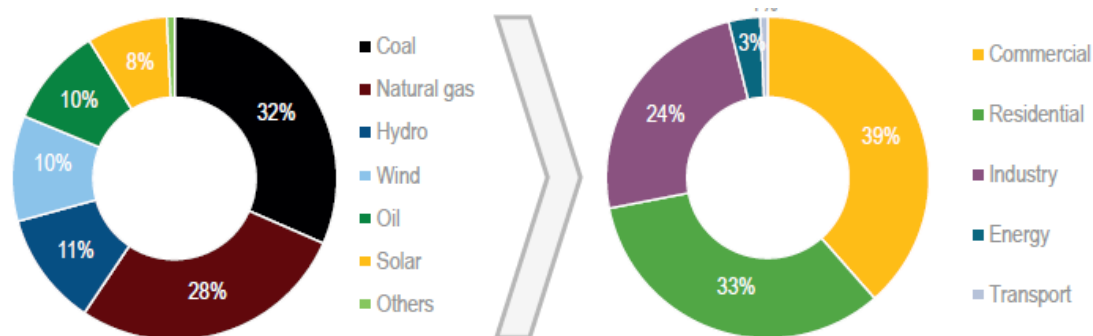
1.1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα η κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί οι οποίοι βρίσκονται κυρίως στο βόρειο κομμάτι της χώρας (ενδεικτικά στην Περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας παράγεται το 50% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας). Η συγκέντρωση των σταθμών στο συγκεκριμένο γεωγραφικό κομμάτι οφείλεται στην ύπαρξη πλουσίων κοιτασμάτων λιγνίτη ο οποίος αποτελεί την κύρια καύσιμη ύλη για αυτούς από την δημιουργία τους. Οι περιοχές με τα μεγαλύτερα σε ποσότητα αποθέματα λιγνίτη βρίσκονται στη Δράμα, στην Δυτική Μακεδονία, στην Ελασσόνα και στη Μεγαλόπολη. (ΡΑΕ 2012)

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (σε όρους παραγωγής και καθαρών εισαγωγών) μειώθηκε κατά 16% από το 2008 έως το 2016, ως αποτέλεσμα της βαθιάς οικονομικής κρίσης. Ο άνθρακας (λιγνίτης) αποτελεί το κυρίαρχο καύσιμο στο μείγμα παραγωγής και ακολουθείται από το φυσικό αέριο και τις ΑΠΕ (ηλιακή και αιολική). Η μεγαλύτερη κατανάλωση παρατηρείται στον εμπορικό τομέα και εν συνεχεία στον οικιακό. Σε εθνικό επίπεδο γίνονται αρκετά βήματα προς την απελευθέρωση των αγορών χονδρικής και λιανικής πώλησης ενέργειας με ουσιαστική πρόοδο στην διαφοροποίηση του μείγματος καυσίμου, ιδίως στην ανάπτυξη μεταβλητών ΑΠΕ, οι οποίες αυξήθηκαν σχεδόν στο 19% της συνολικής παραγωγής για το έτος 2016. Εν συνεχεία, υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες αύξησης μεριδίου της καθαρής ενέργειας με ενσωμάτωση των μη διασυνδεδεμένων νησιών (ΜΔΝ) στο ηπειρωτικό σύστημα ηλεκτρισμού. Η παρούσα μελέτη προσφέρεται από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (ΙΕΑ) στην ενεργειακή ανάλυση που δημοσιεύτηκε και αφορά το έτος 2017. (ΙΕΑ, Greece Review 2017)

Προσφορά και ζήτηση

Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν την σημαντικότερη πρωτογενή εγχώρια πηγή ενέργειας στην ελληνική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσωπεύοντας σχεδόν το 70% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2016. Ωστόσο, παρατηρείται μείωση την τελευταία δεκαετία λόγω της μείωσης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και της αύξησης των ΑΠΕ (αιολική και ηλιακή ενέργεια) που κατέλαβαν σχεδόν το ένα τρίτο της συνολικής παραγωγής.



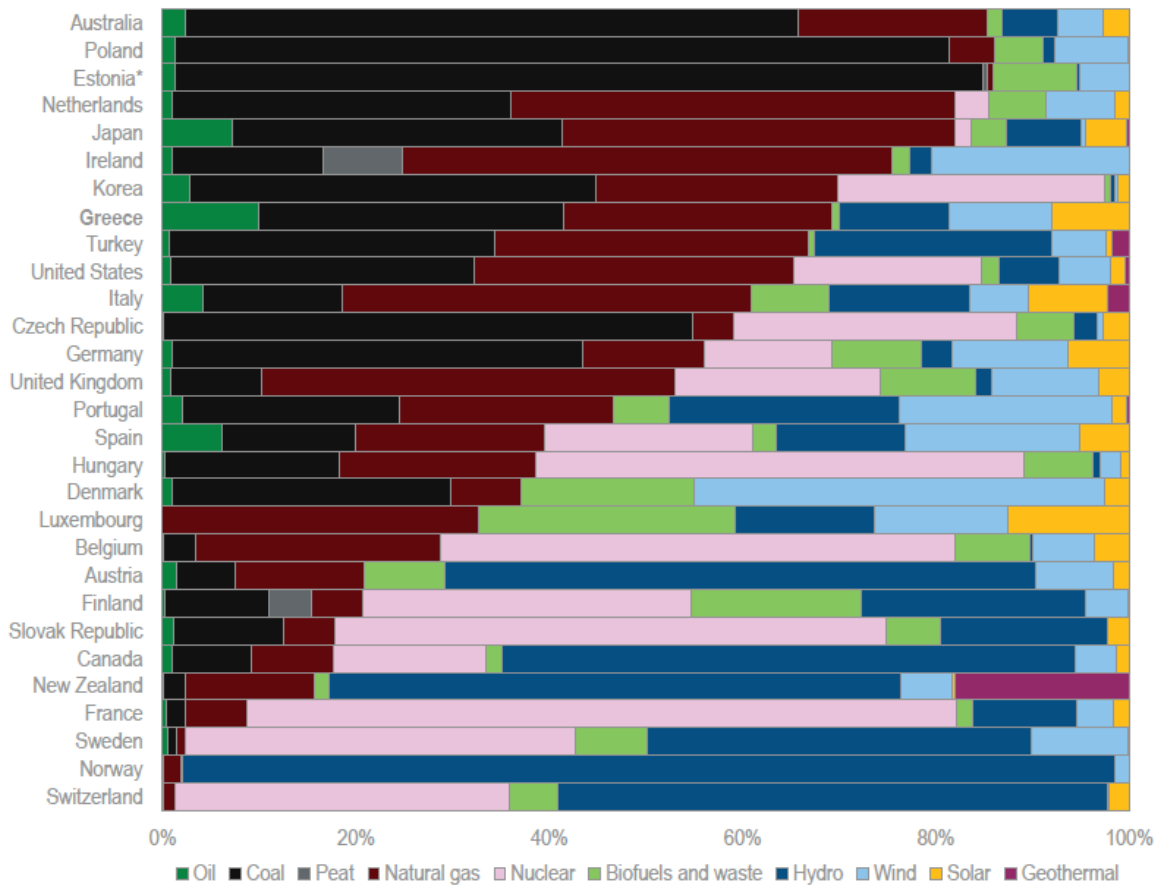
Σχήμα 1-1: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από κάθε πηγή, κατανάλωση από κάθε τομέα για την Ελλάδα, (2015/2016).

Τα στοιχεία προσφοράς αποτελούν εκτίμηση για το 2016 και δεδομένα κατανάλωσης για το 2015.

(πηγή, IEA (2017a), Electricity Information 2017)

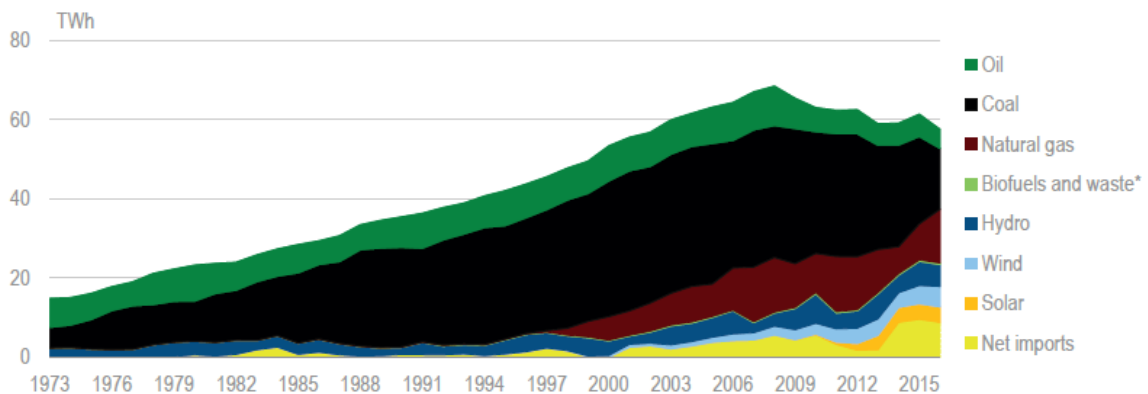
Παραγωγή

Η συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το 2016 ανέρχεται στα επίπεδα των 48,8 TWh (μείωση 19% σε σχέση με το 2006). Ο άνθρακας (λιγνίτης) είναι η μεγαλύτερη ενεργειακή πηγή αντιπροσωπεύοντας το 31,6% , με δεύτερο το φυσικό αέριο στο 27,8%, στοιχεία που αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα και την εγκατεστημένη ισχύ (Πίνακας 1-1). Σε επίπεδο Διεθνής Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency) κατέχει το όγδοο υψηλότερο μερίδιο παραγωγής με χρήση ορυκτών καυσίμων και το υψηλότερο μερίδιο με πετρέλαιο (Σχήμα 1-2). Ωστόσο, η χρήση των ορυκτών καυσίμων παρουσιάζει μείωση την τελευταία δεκαετία. Η παραγωγή μέσω του άνθρακα και του πετρελαίου μειώθηκε κατά περίπου 50% από το 2006 μέχρι το 2016, ενώ αντίθετα, η παραγωγή μέσω ΑΠΕ σχεδόν διπλασιάζεται κατά την ίδια περίοδο (Σχήμα 1-3). Η υδροηλεκτρική ήταν η τρίτη ιεραρχικά μεγαλύτερη πηγή ενέργειας, όμως την μεγαλύτερη αύξηση την παρουσίασαν η αιολική ενέργεια από 2,8% σε 10,5% και η ηλιακή ενέργεια από 0,3% το 2010 σε 8,1% το 2016.



Σχήμα 1-2: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από κάθε πηγή για τις χώρες του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, 2016

(πηγή, IEA (2017b), World Energy Balances 2017)



Σχήμα 1-3: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από κάθε πηγή για την Ελλάδα, 1973 - 2016

(πηγή, IEA (2017b), World Energy Balances 2017)

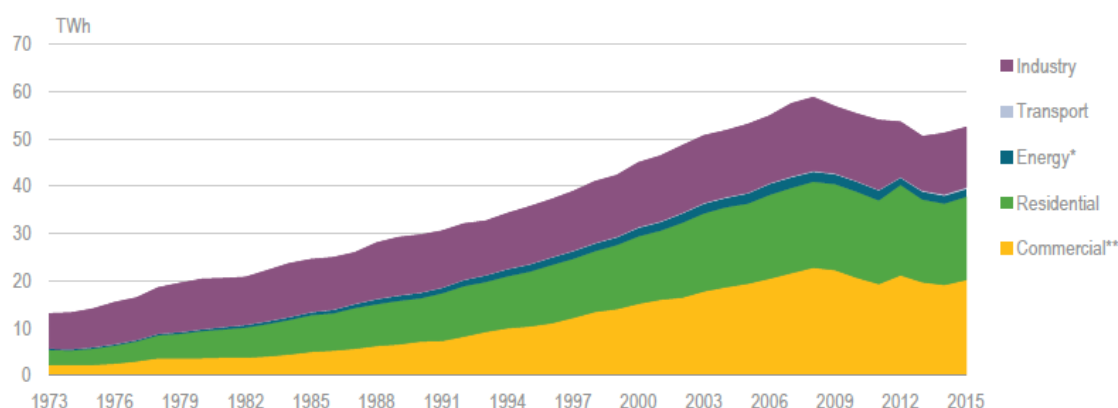
Πίνακας 1-1: Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς από κάθε πηγή για την Ελλάδα, 2000 – 2015 (MW)

(πηγή, IEA (2017a), Electricity Information 2017)

Energy source	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Combustible fuels	7 606	9 708	10 597	11 048	11 226	11 229	10 932	10 855
Coal and coal products	4 492	4 808	4 793	4 793	4 556	4 556	4 302	4 302
Natural gas and gas works gas	1 112	2 529	3 252	3 677	4 117	4 103	4 068	3 972
Liquid fuels, including refinery gas	1 966	2 318	2 505	2 505	2 503	2 500	2 492	2 503
Other combustible fuels	36	53	47	73	50	70	70	78
Hydro	3 072	3 106	3 215	3 224	3 236	3 238	3 389	3 392
Wind	226	491	1 298	1 640	1 753	1 809	1 978	2 091
Solar photovoltaics	0	0	1	202	612	1 536	2 579	2 596
Total capacity	10 904	13 306	15 312	16 524	17 751	18 855	18 895	18 942

Κατανάλωση

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας παρουσίασε σταθερά ανοδική πορεία μέχρι το έτος 2008 όπου έφτασε την ανώτατη τιμή των 58,5 TWh. Στην συνέχεια, ακολούθησε καθοδική πορεία πέντε ετών από το 2009 μέχρι το 2013 επηρεασμένη από την οικονομική κρίση και τέλος ανέκαμψε ελαφρώς τα τελευταία χρόνια φτάνοντας στην τιμή των 52,4 TWh. Οι τομείς ιεραρχικά κατατάσσονται στους: εμπορικός (38% συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας), οικιακός (33,4%) και βιομηχανικός (24,2%). Οι υπόλοιποι τομείς (βιομηχανία ενέργειας και μεταφορές) αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό μερίδιο της συνολικής κατανάλωσης.



Σχήμα 1-4: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε τομέα για την Ελλάδα, 1973 – 2016

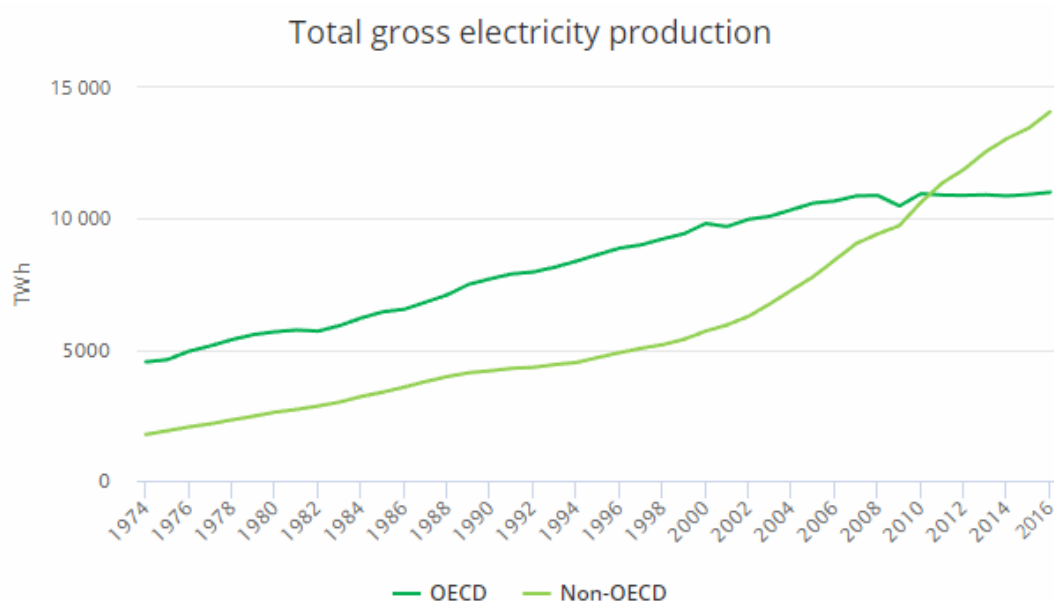
(πηγή, IEA (2017b), World Energy Balances 2017)

Βασικά στοιχεία για το ελληνικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα έτη 2015 – 2016

- **Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (2016):** 48,8 TWh, (μείωση 18,9% σε σχέση με το 2006, καθαρή εισαγωγή 8,8 TWh)
- **Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά πρωτογενείς πηγές (2016):** άνθρακας (31,6%), φυσικό αέριο (27,8%), υδρογόνο (11,4%), πετρέλαιο (9,9%), αιολική ενέργεια (10,5%), ηλιακή ενέργεια (8,1%), βιοκαύσιμα και απόβλητα (0,7%)
- **Εγκατεστημένη ισχύς (2015):** 18942 MW
- **Μέγιστο φορτίο (2015):** 9195 MW
- **Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (2015):** 52,4 TWh

1.1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο

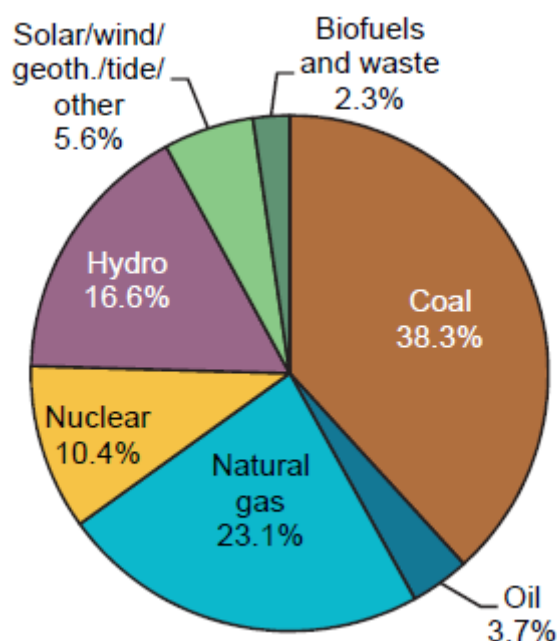
Σε παγκόσμιο επίπεδο χρησιμοποιώντας στοιχεία για το έτος 2016 από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency) ([IEA, Electricity Information 2018](#)) παρατηρούμε πως η παγκόσμια ποσότητα μεικτής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Gross electricity production) ανέρχεται στις 25082 TWh. Στο Σχήμα 1-5 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της παγκόσμιας ποσότητας μεικτής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για την χρονική περίοδο 1974 – 2016 η οποία παρουσιάζει αύξηση από τις 6298 TWh στο επίπεδο των 25082 TWh. Η μέση ετήσια αύξηση είναι της τάξης του 3,3% ενώ το τελευταίο έτος (2015-2016) παρουσιάστηκε στο 2,9%. Ουσιαστικά, παρατηρούμε συνεχή αύξηση με εξαίρεση την περίοδο 2008 – 2009 όπου η οικονομική κρίση στις χώρες του ΟΟΣΑ (OECD) δηλαδή του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης προκάλεσαν ορατή πτώση στην παγκόσμια παραγωγή. Επίσης το μερίδιο παραγωγής των χωρών του ΟΟΣΑ ανέρχεται στο 56,2% της συνολικής παραγωγής.



Σχήμα 1-5: Συνολική παραγωγή μεικτής ηλεκτρικής ενέργειας, 1974 – 2016

(πηγή, IEA (2018), Electricity Information 2018)

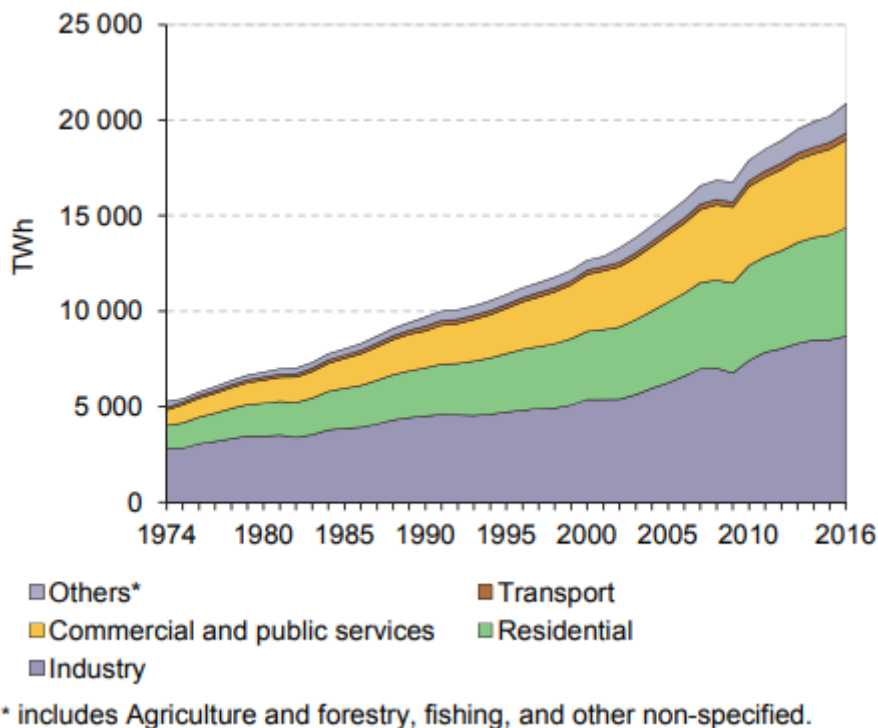
Στην συνέχεια βλέπουμε στο Σχήμα 1-6 το μερίδιο παραγωγής από κάθε πηγή ενέργειας. Το μερίδιο παραγωγής των εύφλεκτων καυσίμων αντιπροσωπεύει το 67,3% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα εύφλεκτα καύσιμα περιλαμβάνουν τον άνθρακα, το πετρέλαιο όπως και τα προϊόντα τους, το φυσικό αέριο, τα βιοκαύσιμα συμπεριλαμβανομένης της στερεής βιομάζας και των ζωικών προϊόντων, τα αέρια-υγρά από βιομάζα καθώς και τα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα. Για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρατηρούμε ότι κατέχουν ένα σημαντικό ποσοστό παραγωγής το οποίο σε βάθος χρόνου αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος.



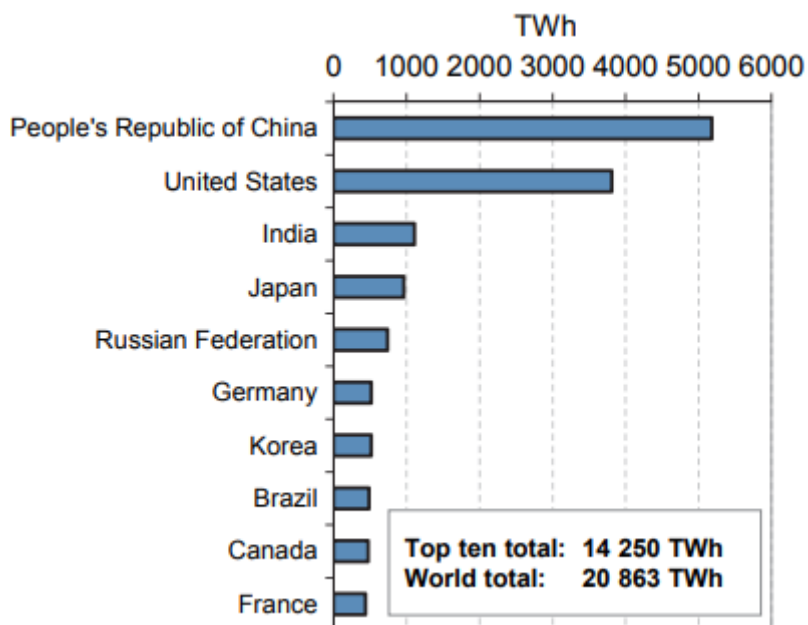
Σχήμα 1-6: Παγκόσμια παραγωγή μεικτής ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε πηγή, 2016
(πηγή, IEA (2018), Electricity Information 2018)

Κατανάλωση

Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2016 ανέρχεται στις 20863 TWh, αυξημένη κατά 3,2% σε σχέση με το 2015. Η μέση ετήσια αύξηση της κατανάλωσης για την περίοδο 1974 – 2016 είναι της τάξης του 3,3% όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 1-7. Τέλος στο Σχήμα 1-8 παρουσιάζεται ενδεικτικά η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τις δέκα χώρες που καταναλώνουν τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας.



Σχήμα 1-7: Παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε τομέα, 1974 – 2016
 (πηγή, IEA (2018), Electricity Information 2018)



Σχήμα 1-8: Δέκα χώρες με την μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, 2016
 (πηγή, IEA (2018), Electricity Information 2018)

1.1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.1.3.1 Εισαγωγή στις ΑΠΕ

Η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας που προκύπτει από τα παραπάνω στοιχεία καθιστά επιτακτική ανάγκη την στροφή του ενεργειακού σχεδιασμού κάθε χώρας ξεχωριστά, αλλά και του ενιαίου παγκοσμίου ενεργειακού πλαισίου σε τρόπους παραγωγής ενέργειας οι οποίοι είναι φιλικότεροι προς το περιβάλλον. Τα ορυκτά καύσιμα που υπάρχουν στον πλανήτη είναι περιορισμένα και με τους τωρινούς ρυθμούς θεωρείται μαθηματικά βέβαιη η εξάντληση τους. Ταυτόχρονα, η περιβαλλοντική επιβάρυνση που επιφέρουν εμφανίζεται ιδιαίτερα ανησυχητική και αποτελεί από τα σημαντικότερα προβλήματα που καλούνται να λύσουν οι σύγχρονοι επιστήμονες. Ως αποτέλεσμα, τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει η τάση σταδιακής αλλαγής από συμβατικές μεθόδους στην χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω επικείμενης νομοθεσίας με κίνητρα εγκατάστασης όπως χρηματοδότηση και φιλική νομοθεσία, ειδικότερα σε χώρες που λόγω κλίματος προσφέρονται για την αξιοποίηση τους όπως η Ελλάδα.

Ορισμός

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές οι οποίες βρίσκονται ανεξάντλητες στο περιβάλλον. Αποτελούν ιδανικό εναλλακτικό τρόπο παραγωγής ενέργειας συντελώντας στην προστασία του περιβάλλοντος, αφού η χρήση τους δεν το επιβαρύνει και η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνο από την ανάπτυξη οικονομικά συμφερούσων και αξιόπιστων τεχνολογιών δέσμευσης του δυναμικού τους. Παράλληλα, με σταδιακή υιοθέτηση και εγκατάσταση τέτοιων μονάδων είναι δυνατή, για χώρες με μεγάλο δυναμικό όπως η Ελλάδα, η απεξάρτηση από το εισαγόμενο πετρέλαιο το οποίο χαρακτηρίζεται από ακριβή τιμή ενισχύοντας την αξιοπιστία και την ενεργειακή αυτονομία του δικτύου.

Μορφές ΑΠΕ

Οι μορφές των ΑΠΕ που έχουν οριστεί είναι οι παρακάτω:

- **Αιολική Ενέργεια:** η κινητική ενέργεια του ανέμου που μετατρέπεται μέσω των ανεμογεννητριών σε μηχανική ενέργεια μέσω της πτερωτής και στην συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της περιστρεφόμενης ατράκτου. Αποτελεί μία αρκετά διαδεδομένη μορφή με μεγάλη εξέλιξη στην τεχνολογία των Α/Γ οι οποίες φτάνουν διάμετρο πτερωτής ίση με 160 μέτρα και δυνατότητα παραγωγής 8-10 MW. Θεωρείται τόσο σημαντική λόγω του άφθονου καυσίμου, μηδαμινών ρύπων και δυνατότητα χρήσης σε αποκεντρωμένα συστήματα (offshore).
- **Υδραυλική Ενέργεια:** χρησιμοποιείται στα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα (κυρίως στα μικρά μέχρι 15 MW ηλεκτρικής ισχύος) αξιοποιώντας την

ενέργεια των υδατοπτώσεων με έναν αγωγό υπό πίεση και έναν υδροστρόβιλο. Αποτελούν την πιο διαδεδομένη ΑΠΕ και εμφανίζει περιορισμένη επίπτωση στο περιβάλλον.

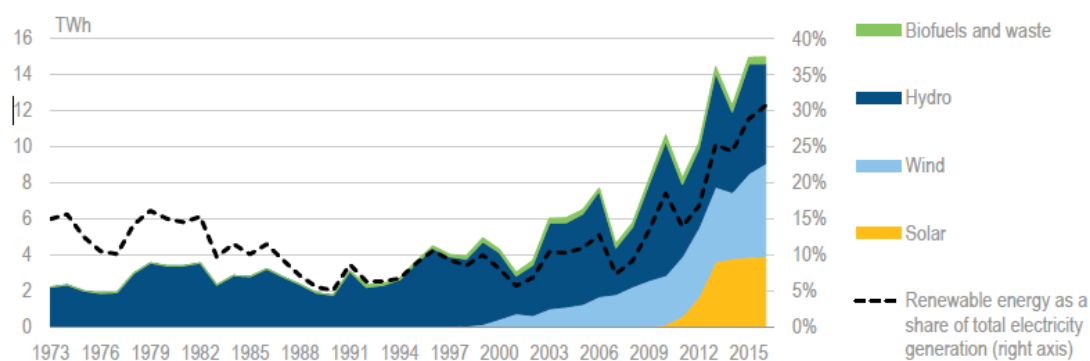
- **Ηλιακή Ενέργεια:** αξιοποιεί την ενέργεια του ήλιου και χωρίζεται σε α) ενεργητικά ηλιακά συστήματα, που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα, β) βιοκλιματικό σχεδιασμό και παθητικά ηλιακά συστήματα, που μέσω συγκεκριμένων κατασκευών με χρήση κατάλληλων δομικών υλικών μεγιστοποιούν την απευθείας εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, κλιματισμό ή φωτισμό εσωτερικών χώρων και γ) φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα, που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια. Κυριότερο μειονέκτημά τους είναι η απαίτηση μεγάλων επιφανειών για την εγκατάστασή τους και το υψηλό κόστος κτήσεώς τους.
- **Βιομάζα:** κάθε είδους υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυσικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής (με προαιρετική ύπαρξη βιομηχανικής επεξεργασίας) και αστικά λύματα και απορρίμματα. Αξιοποιούνται χωρίς κατεργασία (απευθείας καύση), με διάφορες θερμοχημικές (πυρόλυση, αεριοποίηση) και βιοχημικές διεργασίες (αερόβια ζύμωση). Μέσω της συγκεκριμένης μορφής είναι δυνατή η ενεργειακή αξιοποίηση των απορριμμάτων δίνοντας λύση σε ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των αστικών κέντρων.
- **Γεωθερμική Ενέργεια:** αξιοποιεί την ενέργεια που προσφέρεται από το εσωτερικό της γης και εμφανίζεται κυρίως σε υπόγεια ή επιφανειακά ρεύματα νερού, σε ατμούς και σε στερεά σώματα (πετρώματα).

1.3.1.2 Διείσδυση των ΑΠΕ στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα

Η Ελλάδα είναι μια χώρα η οποία διαθέτει υψηλότατο δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με το ενεργειακό πλάνο να στοχεύει τα τελευταία χρόνια στην ευρεία αύξηση της χρήσης τους (κυρίως αιολικών και ηλιακών φωτοβολταϊκών) έναντι των συμβατικών καθιερωμένων πηγών όπως ο λιγνίτης. Για την επίτευξη του στόχου παρέχονται γενναιόδωρες Feed-in-tariffs (Εγγυημένες διαφορικές τιμές), που ουσιαστικά είναι η εγγυημένη τιμή που θα λάβει ο εκάστοτε επενδυτής για την κάθε κιλοβατώρα (kWh) που παράγει, και πραγματοποιούνται ανταγωνιστικές δημοπρασίες για ηλιακά φωτοβολταϊκά και αιολικές μονάδες. Στην όλη κατάσταση συντελεί η μείωση του τεχνολογικού κόστους με την πάροδο των χρόνων, η ανάπτυξη ασφαλιστρών βάσει της αγοράς με σκοπό την αποφυγή υψηλών υπερβάσεων στο κόστος, οι παροχές του προγράμματος Feed in Premium (FiP) και η επιτάχυνση – απλούστευση των σύνθετων διαδικασιών αδειοδότησης. Το γενικότερο ελληνικό ενεργειακό μίγμα μπορεί να διαφοροποιηθεί ακόμα περισσότερο με αύξηση της συμβολής της αιολικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης σύνδεσης των μεγάλων νησιών με το κεντρικό ηπειρωτικό σύστημα.

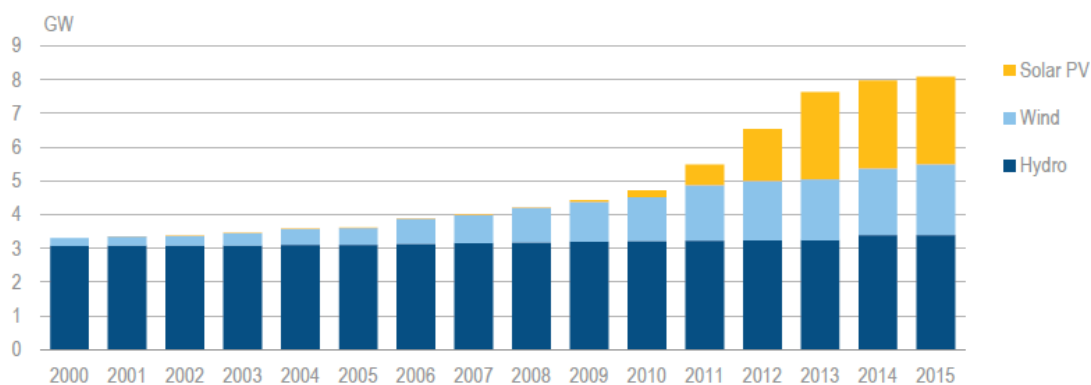
Σύμφωνα με την έρευνα του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA) (IEA, Greece Review 2017) οι ΑΠΕ έφθασαν το 31% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2016 (Σχήμα 1-9), κάτι που οφείλεται στην ραγδαία αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής και ηλιακής ισχύος και στην μείωση της συνολικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την τελευταία δεκαετία. Η συνολική παραγωγή ανήλθε σε 62,9 TWh το 2008 και από τότε μειώθηκε κατά 22%. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας αυξήθηκε από τα πολύ χαμηλά αμελητέα επίπεδα στα τέλη της δεκαετίας του 1990 σε 5,1 TWh το 2006, ποσό που αντιστοιχεί στο 10,5% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια παρουσίασε ακόμη εντυπωσιακότερη ανάπτυξη, καταφέροντας στο διάστημα 2010 – 2016 να αυξηθεί σχεδόν είκοσι πέντε φορές από 0,16 TWh σε 3,9 TWh. Η υδροηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει σταθερά το μεγαλύτερο μερίδιο παραγωγής από ΑΠΕ φθάνοντας το έτος 2016 τις 5,5 TWh που αντιστοιχούν στο 11,4% της συνολικής παραγωγής, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει σημαντικές ετήσιες διακυμάνσεις. Τέλος, υπάρχει ένα μικρό μερίδιο παραγωγής από βιοκαύσιμα που αντιπροσωπεύει λιγότερο από το 1% της συνολικής.

Το μερίδιο των μεταβλητών ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανήλθε σε 19% για το 2016. Ενώ η αιολική ενέργεια αυξάνεται συνεχώς, η ανάπτυξη ηλιακών ενεργειακών κατασκευών έχει επιβραδυνθεί τα τελευταία χρόνια και κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα, με αύξηση της τάξης του 8% της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας μεταξύ του 2013 και του 2016 (Σχήματα 1-8 και 1-9).



Σχήμα 1-9: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ποσοστό για κάθε πηγή στην Ελλάδα, 1973-2016

(πηγή, IEA (2017a), World Energy Balances 2017)



Σχήμα 1-10: Εγκατεστημένη ισχύς υδροηλεκτρικής, αιολικής και ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα, 2000-2015

(πηγή, IEA (2017b), Electricity Information 2017)

Βασικά στοιχεία για το ελληνικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ για το έτος 2016

- **Συνολική παροχή:** 15 TWh, (30,7% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας), μέσος όρος χωρών της ΔΟΕ: 24,2% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- **Υδροηλεκτρική ενέργεια:** 5,5 TWh (11,4% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας)
- **Αιολική ενέργεια:** 5,1 TWh (10,5% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας)
- **Ηλιακή ενέργεια:** 3,9 TWh (8,1% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας)
- **Βιοκαύσιμα και απόβλητα*** : 0,4 TWh (0,7% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας)

* Τα βιοκαύσιμα και τα απόβλητα περιλαμβάνουν στερεά, υγρά και αέρια βιοκαύσιμα όπως και δημοτικά και βιομηχανικά απόβλητα

1.2 Πρόβλημα ένταξης μονάδων

1.2.1 Εισαγωγή

Η ανθρώπινη δραστηριότητα σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη επαναλαμβανόμενων ενεργειών. Κατά συνέπεια, τα περισσότερα συστήματα που παρέχουν υπηρεσίες σε μεγάλο μέρος του πληθυσμού, ακολουθούν την επανάληψη της παραπάνω δραστηριότητας (όπως για παράδειγμα τα συστήματα μεταφοράς, επικοινωνίας καθώς τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας). Συγκεκριμένα, για τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι μεγαλύτερο κατά την διάρκεια των μεσημβρινών ωρών λόγω αυξημένης ζήτησης λόγω αυξημένων βιομηχανικών και οικιακών αναγκών. Επίσης η ζήτηση σε ηλεκτρικό φορτίο εμφανίζει διακυμάνσεις και στις διάφορες μέρες της εβδομάδας (μεταξύ ημερών εντός της εβδομάδος και αυτές του σαββατοκύριακου), αλλά και διακυμάνσεις σε διάφορες περιόδους του ημερολογιακού έτους. Ως αποτέλεσμα, εμφανίζεται το Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων Παραγωγής (Unit Commitment Problem, PEM) στο σύστημα με σκοπό τον καθορισμό του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων σε κάθε περίοδο (συνήθως λαμβάνεται ωριαία) ώστε να καλύπτεται κάθε στιγμή η ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό το Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων πρόκειται για ένα πρόβλημα οικονομικής επιστήμης και ταυτόχρονα βελτιστοποίησης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την χρήση κάποιας μονάδας απαιτείται η εκκίνησή της, ο συγχρονισμός της με τις αντίστοιχες προδιαγραφές του συστήματος και η σύνδεσή της ώστε να είναι σε θέση να μεταδώσει την ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια (συνοδευόμενη σε κάθε στάδιο από αντίστοιχα κόστη). Επομένως, ιδανικό αποτέλεσμα της επίλυσης του PEM είναι το χρονοδιάγραμμα παραγωγής το οποίο καλύπτει τη αναμενόμενη ζήτηση με αξιοπιστία και στο ελάχιστο δυνατό κόστος.

1.2.2 Επίλυση Προβλήματος Ένταξης Μονάδων

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων αποτελεί ζήτημα υψίστης σημασίας για την βιομηχανία παραγωγής ενέργειας και εντάσσεται στην επιστήμη της Επιχειρησιακής Έρευνας. Με την ελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανάγεται συνεχώς σε επιτακτική ανάγκη η δυνατότητα κατάστρωσης προγράμματος παράγωγης για οποιοδήποτε σύστημα ανεξάρτητα με το μέγεθός του. Ουσιαστικά, αναζητεί τον βέλτιστο συνδυασμό μονάδων που μέσω της λειτουργίας τους θα παράξουν το ζητούμενο φορτίο ηλεκτρικής ενέργειας, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τα λειτουργικά κόστη. Στα λειτουργικά κόστη συμπεριλαμβάνονται τα κόστη λόγω εκπομπών ρύπων, εκκίνησης μονάδας, κλεισίματος μονάδας και παραγωγής. Κατά τη διαδικασία προσδιορισμού του βέλτιστου συνδυασμού λαμβάνονται υπόψη οι διάφοροι περιορισμοί του προβλήματος, οι οποίοι εκφράζουν είτε τα θερμικά - λειτουργικά όρια των ίδιων των μονάδων που διαθέτει το σύστημα είτε όρια οικονομικής φύσεως. Παράλληλα με την ελαχιστοποίηση του κόστους, το PEM μπορεί να ωφελήσει και στην προστασία του περιβάλλοντος έχοντας ως κριτήριο και την ελάχιστη δυνατή εκπομπή ρύπων ή την εξέταση σεναρίων με χρήση

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (πχ. ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρικά) έναντι συμβατικών μονάδων.

Για πολλές δεκαετίες το πρόβλημα ένταξης μονάδων αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης εμφανίζοντας δυσκολία στην επίλυση του λόγω της πολυπλοκότητας του. Πρόκειται για ένα μεγάλης κλίμακας, μεικτό ακέραιο, συνδυαστικό, μη γραμμικό πρόβλημα που κάθε προσπάθεια επίλυσής του επηρεάζεται ιδιαίτερα από την υπολογιστική ισχύ του ηλεκτρονικού υπολογιστή που θα κληθεί να το λύσει αλλά και από τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί. Η επίλυση του PEM χωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα:

- Προσδιορισμός μονάδων οι οποίες θα είναι σε κατάσταση λειτουργίας για κάθε περίοδο που εξετάζεται με σκοπό την κάλυψη της ζήτησης του δικτύου.
- Οικονομική κατανομή φορτίου (Economic Dispatch), δηλαδή τον προσδιορισμό του ποσού ενέργειας που θα παράγει κάθε μονάδα η οποία έχει επιλεγεί να βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας.

Αξίζει να σημειωθεί πως το πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου (ΟΚΦ, Economic Dispatch) αποτελεί ένα ξεχωριστό πρόβλημα της Επιχειρησιακής Έρευνας το οποίο ωστόσο είναι απαραίτητο να επιλυθεί στην πορεία του PEM και λειτουργούν με κοινό σκοπό, την ελαχιστοποίηση το κόστους. Πιο συγκεκριμένα η κύρια διαφορά των δύο προβλημάτων έγκειται στο γεγονός πως το πρόβλημα ΟΚΦ υποθέτει συγκεκριμένο αριθμό ήδη δεσμευμένων μονάδων παραγωγής στις οποίες καθορίζει την παραγόμενη ενέργεια από κάθε μονάδα για κάθε περίοδο. Αντίθετα στο PEM, γίνεται πρόβλεψη της ζήτησης και με συγκεκριμένο αριθμό διαθέσιμων μονάδων γίνεται προσδιορισμός του ποιες μονάδες θα χρησιμοποιηθούν και τι ποσό ενέργειας θα παράξουν. Επομένως, ο αλγόριθμος επίλυσης πρέπει να εξετάσει τα διάφορα σενάρια για κάθε συνδυασμό μονάδων σε λειτουργία και να καθορίσει το βέλτιστο. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας αυξάνεται με την ύπαρξη δυαδικών μεταβλητών που εκφράζουν την κατάσταση της κάθε μονάδας για κάθε χρονική περίοδο.

1.2.3 Περιορισμοί του Προβλήματος Ένταξης Μονάδων

Οι περιορισμοί σε οποιοδήποτε πρόβλημα Επιχειρησιακής Έρευνας αποτελούν ένα πολύ σημαντικό μέρος της μοντελοποίησης καθώς διαμορφώνουν το πόσο κοντά σε πραγματικές εφαρμογές βρίσκεται το παραγόμενο μοντέλο. Αποτελούν το στοιχείο που κατευθύνει το πρόβλημα στην εξεταζόμενη μορφή και οδηγεί την λύση σε επιθυμητό εύρος. Στην περίπτωση του PEM (UCP) υπάρχουν πολλοί περιορισμοί που μπορούν να ενταχθούν ανάλογα με το ανεξάρτητο σύστημα παραγωγής, την αγορά ενέργειας, τον παράγοντα της αξιοπιστίας. Ως αποτέλεσμα υπάρχουν διαφορετικοί κανόνες για τον προγραμματισμό των μονάδων που επηρεάζονται από την σύνθεση την παραγωγής, τα χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτίου, κλπ. Στην συνέχεια γίνεται παράθεση των βασικών περιορισμών οι οποίοι είναι κοινοί για τα περισσότερα συστήματα, (Wood, Wollenberg, Sheblé, 2013).

- Στρεφόμενη εφεδρεία (Spinning Reserve)

Με τον όρο στρεφόμενη εφεδρεία περιγράφεται η συνολική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί εφόσον συνδεθούν στο σύστημα όλες οι μονάδες μείον το παρόν παραγόμενο φορτίο και τις απώλειες ισχύος. Ο σκοπός είναι σε περίπτωση αστοχίας μιας ή περισσοτέρων μονάδων να είναι σε θέση το σύστημα να παράγει το ζητούμενο φορτίο μέσα σε εύλογο χρονικό διάστημα. Συνήθως ορίζεται ως ποσοστό της προβλεπόμενης μέγιστης τιμής του ζητούμενου φορτίου ή ως την ισχύ που παράγει η μονάδα με το μεγαλύτερο φορτίο σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Σε μερικά συστήματα υπάρχει πρόβλεψη ώστε σε περίπτωση αστοχίας να δίνεται προτεραιότητα σε μονάδες άμεσης απόκρισης με σκοπό την αύξηση της αξιοπιστίας.

Θερμικοί περιορισμοί (Thermal Constraints)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι θερμικοί περιορισμοί των μονάδων. Οι συγκεκριμένοι περιορισμοί έχουν την ιδιαιτερότητα πως συνήθως απαιτείται η παρέμβαση του χειριστή για να ικανοποιηθούν, ειδικότερα σε μεταβολές της κατάστασης λειτουργίας. Κάθε μονάδα μπορεί να υποστεί μόνο βαθμιαίες θερμοκρασιακές αλλαγές με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο να περάσει κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι η μονάδα να συγχρονιστεί στο σύστημα και να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας.

- **Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας (Minimum uptime):** Ως ελάχιστος χρόνος λειτουργίας ορίζεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εφόσον μια μονάδα βρεθεί σε λειτουργία πρέπει να παραμείνει σε αυτή την κατάσταση πριν να είναι σε θέση να αποσυνδεθεί.
- **Ελάχιστος χρόνος κράτησης (Minimum downtime):** Ως ελάχιστος χρόνος κράτησης ορίζεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εφόσον μια μονάδα αποσυνδεθεί πρέπει να παραμείνει σε αυτή την κατάσταση πριν να είναι σε θέση να συνδεθεί στο δίκτυο.
- **Περιορισμοί προσωπικού (Crew constraints):** Σε περίπτωση που κάποιο που κάποιο σύστημα απαρτίζεται από δύο ή παραπάνω μονάδες μπορεί να μην μπορούν να ενταχθούν ταυτόχρονα σε κατάσταση λειτουργίας λόγω έλλειψης προσωπικού.
- **Περιορισμοί κλίσης (Ramp Rates):** Ως περιορισμοί κλίσης ορίζεται το ποσό ενέργειας κατά το οποίο μπορεί να αυξομειωθεί η παραγωγή ισχύος κάθε μονάδας με το πέρασμα μιας χρονικής περιόδου του συστήματος. Αντίστοιχα ορίζεται και περιορισμός κλίσης για την σύνδεση και την αποσύνδεση της κάθε μονάδας (startup/shutdown ramp limit).
- **Χωρητικότητα μονάδας (Capacity):** Η χωρητικότητα κάθε μονάδας ορίζει το μέγιστο ποσό ισχύος το οποίο μπορεί να παράξει κάθε μονάδα
- **Ελάχιστη Ισχύς (Minimum power):** Αντίστοιχα κάθε μονάδα παρουσιάζει ελάχιστο ποσό ισχύος το οποίο είναι σε θέση να παράξει. Ο συγκεκριμένος περιορισμός σε συνδυασμό με τον παραπάνω ορίζουν τα όρια παραγωγής (Generating Limits).

1.2.4 Μέθοδοι επίλυσης του Προβλήματος Ένταξης Μονάδων

Το PEM ως μεγάλης κλίμακας πρόβλημα και αντίστοιχα με ευρεία εφαρμογών στην βιομηχανική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποτέλεσε αντικείμενο πληθώρας επιστημονικών ερευνών. Παρατηρείται μεγάλο εύρος προσεγγίσεων είτε μέσω πολύπλοκων, θεωρητικών μαθηματικών μεθόδων είτε ακόμα και απλών αλγορίθμων επιλογής. Η αποδοτικότητα κάθε προσέγγισης βασίζεται στο αποτέλεσμα που εξάγει συναρτήσει του υπολογιστικού χρόνου αλλά και στον τρόπο που αντιμετωπίζει τους περιορισμούς.

Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μέθοδοι επίλυσης του PEM (UCP) είναι οι εξής:

- Ντετερμινιστικές (κλασσικές) τεχνικές
- Στοχαστικές (μη κλασσικές) τεχνικές
- Υβριδικοί αλγόριθμοι

Η επιστημονική ομάδα των Narayana, Prasad, Padhy (N. P. Padhy, 2004) δημοσίευσαν μια έρευνα με συγκεντρωμένες τις κυριότερες μεθόδους επίλυσης του PEM (UCP) οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

1.2.4.1 Ντετερμινιστικές τεχνικές

Ντετερμινιστικές χαρακτηρίζονται οι μαθηματικές τεχνικές που βασίζονται στην λογική ότι ένα σύνολο δεδομένων, το οποίο θεωρείται πλήρως καθορισμένο, διέρχεται πάντα από συγκεκριμένη ακολουθία καταστάσεων, οπότε με καθορισμένη είσοδο μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια η έξοδος του συστήματος, αγνοώντας πιθανές εξωτερικές διαταραχές. Αποτελούν ιδιαίτερα επιστημονικά διαδεδομένο κλάδο μελέτης λόγω ευκολίας στην εφαρμογή τους από υπολογιστικές μηχανές. Πρακτικά, μέσω ορισμού μιας μαθηματικής συνάρτησης για κάθε είσοδο προκύπτει η μοναδική έξοδος που αποτελεί και το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Οι κυριότερες ντετερμινιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων (UCP) είναι οι παρακάτω:

- Εξαντλητική Απαρίθμηση (Exhaustive Enumeration)

Σε αυτό τον αλγόριθμο γίνεται υπολογισμός του κόστους όλων των πιθανών συνδυασμών των μονάδων παραγωγής και επιλέγεται αυτός με το μικρότερο κόστος παραγωγής σαν βέλτιστη επιλογή. Οι Kerr (Kerr, et al. 1966) και Hara (Hara, et al. 1966) έκαναν χρήση της εξαντλητικής απαρίθμησης για την Florida Power Corporation. Παρόλο που η μέθοδος είναι ασύμφορη από άποψη υπολογιστικού χρόνου, κατάφερε να καταλήξει σε σωστή λύση, παρόλα αυτά δεν είναι η ενδεδειγμένη για προβλήματα μεγάλης κλίμακας.

- Λίστα προτεραιότητας (Priority listing)

Η λίστα προτεραιότητας καθορίζει εξαρχής τις μονάδες που βρίσκονται σε λειτουργία επιλέγοντας αυτές με το χαμηλότερο κόστος. Οι μονάδες που έχουν ήδη επιλεγεί λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιείται το ζητούμενο φορτίο. Οι Burns (Burns, et al. 1975) και Lee (Lee 1988) χρησιμοποίησαν το Priority Listing για επίλυση του ΠΕΜ. Ο Shoults (Shoults, et al. 1980) ανέπτυξε μια πιο άμεση και υπολογιστικά αποδοτική προσέγγιση εισάγοντας στο μοντέλο περιορισμούς για εισαγωγές και εξαγωγές του συστήματος. Ο εκτεταμένος κατάλογος προτεραιότητας (Extended Priority Listing) είναι μια τροποποιημένη έκδοση (Senjyu et al., 2003) που αποτελείται από δύο στάδια: α) παραβλέποντας του λειτουργικούς περιορισμούς, υπολογίζονται μερικές αρχικές εκδοχές προγραμματισμού των μονάδων με την μέθοδο της λίστας προτεραιότητας, β) με ευρετικές τεχνικές ο προγραμματισμός διαφοροποιείται ώστε να καλυφθούν οι λειτουργικοί περιορισμοί.

- Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming)

Ο αλγόριθμος του δυναμικού προγραμματισμού είναι η πρώτη προσέγγιση βελτιστοποίησης του ΠΕΜ. Η βασική λογική που ακολουθεί είναι πως το συνολικό κόστος παραγωγής X megawatt (MW) φορτίου από N μονάδες παραγωγής πρέπει να είναι το κατώτατο δυνατό. Αντίστοιχα, το φορτίο Y MW που παράγει κάποια μονάδα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε και το κόστος παραγωγής του υπόλοιπου ($X-Y$) MW φορτίου να είναι το κατώτατο δυνατό, κοκ. Παρουσιάζει ευκολία στην προσθήκη περιορισμών που επηρεάζουν την παραγωγή συγκεκριμένες ώρες (Lee, et al. 1994) αλλά δυσκολία σε αντίστοιχες προσθήκες που αφορούν συγκεκριμένες μονάδες καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας (Arroyo and Conejo 2002) .

- Branch and Bound

Η μέθοδος Branch and Bound αποτελεί έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης ο οποίος στηρίζεται στην επανάληψη των παρακάτω βημάτων. Αρχικά, το διάστημα στο οποίο είναι γνωστό πως βρίσκεται η λύση (μέσω των περιορισμών και των μεταβλητών απόφασης) χωρίζεται σε υποσύνολα. Τα υποσύνολα στα οποία όλα τα στοιχεία παραβιάζουν κάποιο περιορισμό αποκλείονται. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ένα ανώτατο όριο για την πιθανή λύση και αντίστοιχα για κάθε υποσύνολο προκύπτει κάποιο κατώτατο όριο με σκοπό να επιτευχθεί η ζητούμενη σύγκλιση και η αντίστοιχη λύση. Εφόσον, θέλουμε η σύγκλιση να είναι απόλυτη θα πρέπει το ανώτατο και κατώτατο όριο να ταυτίζονται, κάτι που είναι εφικτό κυρίως σε μικρότερα προβλήματα λόγω υπολογιστικού κόστους οπότε στα μεγαλύτερης κλίμακας τίθεται ένα αποδεκτό σχετικό σφάλμα. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο απαιτούμενος χρόνος καθώς η πραγματικά βέλτιστη λύση μπορεί να προκύψει μόνο με την διαδοχική απόρριψη διαφόρων συνόλων πιθανών λύσεων και ταυτόχρονα ο προσδιορισμός του εκάστοτε ανωτάτου ορίου απαιτεί την αντιμετώπιση του χρονοβόρου προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου (Economic dispatch) . Οι Lauer (Lauer, et al. 1982) και Cohen (Cohen, et al. 1983) και οι συνεργάτες τους παρουσίασαν την μέθοδο

Branch and Bound ενσωματώνοντας χρονικά εξαρτώμενους περιορισμούς χωρίς την ανάγκη εξαρχής επιλογής των μονάδων που θα βρίσκονται σε λειτουργία.

- Λαγκραντζιανή Χαλάρωση (Lagrangian Relaxation)

Ο αλγόριθμος της λαγκραντζιανής χαλάρωσης αντιμετωπίζει το ΠΕΜ ως μια συνάρτηση του κόστους που προκύπτει από το άθροισμα του επιμέρους κόστους με τους αντίστοιχους περιορισμούς κάθε μονάδας. Πρόκειται για αρκετά πιο σύγχρονη μέθοδο σε σχέση με τον δυναμικό προγραμματισμό και είναι ιδιαίτερα αποδοτική ως προς την εύρεση ολικής λύσης όσο αυξάνονται οι μονάδες παραγωγής καθώς μηδενίζεται η πιθανότητα εύρεσης μη βέλτιστης λύσης (suboptimality). Παρουσιάζει ευκολία στην τροποποίηση του μοντέλου ώστε να μοντελοποιηθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως και επιμέρους στοιχεία για κάθε μονάδα. Βασικό μειονέκτημα είναι η εγγενής υποβελτιστοποίηση που παρουσιάζει. Από τους πρώτους που την χρησιμοποίησαν ήταν ο Merlin (Merlin, et al. 1983) που την κατοχύρωσε στο Electricite De France και ακολούθησε ο Aoki (Aoki, et al. 1989) που την εφήρμοσε σε πρόβλημα μεγάλης κλίμακας.

1.2.4.2 Στοχαστικές τεχνικές – Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Στοχαστικές ονομάζονται οι τεχνικές με στόχο ελαχιστοποίησης (ή μεγιστοποίησης) μιας ορισμένης μαθηματικής συνάρτησης με την ένταξη της τυχαιότητας στην διαδικασία της βελτιστοποίησης. Η λογική τους πηγάζει από την αβεβαιότητα που εμφανίζεται σε πραγματικές συνθήκες. Για να είναι αποτελεσματικές ορίζεται μικρό εύρος δυνατών τιμών, με σκοπό την εύρεση εφικτών λύσεων μέσω βελτιστοποίησης αυτών με μηχανισμούς διόρθωσης και ένταξης ορισμένων δεδομένων σε πιθανοτικές κατανομές που κατευθύνουν την λύση. Αποτελούν σύγχρονη προσέγγιση για το πρόβλημα ένταξης μονάδων με μεγάλο περιθώριο ανάπτυξης. Οι κυριότερες στοχαστικές τεχνικές παρουσιάζονται ως εξής:

- Έμπειρα Συστήματα (Expert Systems)

Τα έμπειρα συστήματα αποτελούν ένα έξυπνο προγραμματιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιεί γνώσεις και διαδικασίες εξαγωγής συμπερασμάτων για την επίλυση προβλημάτων που είναι αρκετά δύσκολα ώστε να θεωρείται απαραίτητη η ανθρώπινη εμπειρογνωμοσύνη για τις λύσεις τους. Αντλώντας πληροφορίες από ειδικούς ανθρώπους στον τομέα του εκάστοτε προβλήματος γίνεται προσπάθεια μίμησης της μεθοδολογίας που ακολουθούν και της απόδοσής τους. Σε αντίθεση βέβαια, με τον ανθρώπινο νου τα παρόντα προγράμματα δεν μπορούν να εξελιχθούν μέσω των εμπειριών τους οπότε η γνώση πρέπει να παρέχεται από ανθρώπινο παράγοντα σε γλώσσα προγραμματισμού. Ο Mokhtari και οι συνεργάτες του (Mokhtari, et al. 1988) ανέπτυξαν ένα πρόγραμμα εξειδίκευσης για παροχή βοήθειας σε μη έμπειρους χειριστές για τον προγραμματισμό παραγωγής ισχύος και τον χειρισμό των μονάδων. Ο Ouyang και οι συνεργάτες του (Ouyang, et al. 1990) δημιούργησαν ένα σύστημα εξειδίκευσης για την ένταξη μονάδων που αποτελούσαν

από μια βάση δεδομένων προγραμμάτων ένταξης, μια δυναμική διαδικασία κάλυψης φορτίου και μια διαδικασία βελτιστοποίησης.

- Αλγόριθμος Αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Search Algorithm)

Τα μυρμηγκία είναι ικανά να βρίσκουν τον συντομότερο δρόμο από μια πηγή τροφής στην φωλιά τους χωρίς οπτικά μέσα, χρησιμοποιώντας την φερομόνη. Κάθε μυρμηγκί καθώς βαδίζει αφήνει στο έδαφος μια ποσότητα φερομόνης ως πληροφορία για τα υπόλοιπα, ενημερώνοντάς τα για την πορεία του. Έτσι, λειτουργώντας ως μονάδα ουσιαστικά έχει τυχαία διαδρομή αλλά ως μέρος του συστήματος ακολουθεί την ουσία της φερομόνης που χουν αφήσει τα υπόλοιπα και την ενισχύει με αποτέλεσμα ο πληθυσμός να προσανατολίζεται. Στην παραπάνω λογική, ο αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών αποτελείται από ένα πλήθος τεχνητών μυρμηγκιών τα οποία συνεργάζονται ανταλλάσσοντας πληροφορίες μέσω της «φερομόνης» που τοποθετούν σε γραφικές γωνίες. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε από τους Sisworahardjo και El - Kaib (Sisworahardjo and El-Kaib 2002) για την επίλυση του ΠΕΜ.

Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Οι στοχαστικοί και παράλληλης αναζήτησης αλγόριθμοι που βασίζονται στην φυσική επιλογή αποτελούν ένα ιδιαίτερα επίκαιρο και εξελισσόμενο πεδίο έρευνας για την επίλυση του ΠΕΜ λόγω της δυνατότητας τους να διαχειρίζονται συναρτήσεις με μη κυρτό κόστος κατανάλωσης και μη γραμμικούς περιορισμούς. Κάποιοι από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους είναι οι παρακάτω.

- Απαγορευμένη Έρευνα (Tabu Search)

Ο αλγόριθμος Tabu Search δημιουργήθηκε από τον Fred W. Glover (Glover 1986) και αποτελεί μια τεχνική που ενσωματώνει μεθόδους τοπικής αναζήτησης (Local Search Methods) που χρησιμοποιούνται για την μαθηματική βελτιστοποίηση. Κατά την διάρκεια των τοπικών αναζητήσεων απομονώνονται περιοχές και κάθε σημείο συγκρίνεται με τα γειτονικά του αναζητώντας συνεχώς καλύτερη λύση. Για αποφυγή ατέρμονης αναζήτησης στις επιμέρους περιοχές (λόγω περιοχής με υποβέλτιστη λύση) τα σημεία που έχουν ήδη εξεταστεί εντός μικρού χρονικού διαστήματος απορρίπτονται, γεγονός στο οποίο βασίζεται και το όνομα της μεθόδου. Για την μείωση του απαιτούμενου χρόνου εντάσσονται δομές μνήμης οι οποίες κατευθύνουν την αναζήτηση προς τις πιο ελπιδοφόρες περιοχές ως προς την ύπαρξη της τελικής λύσης.

- Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι δημιουργήθηκαν από τον J. Holland (Holland 1992) ως μια προσπάθεια να εισαχθεί η διαδικασία της φυσικής εξέλιξης στα υπολογιστικά συστήματα. Η μέθοδος περιέχει τέσσερεις γενετικά-εμπνευσμένους τελεστές: επιλογή (selection), διασταύρωση (crossover), μετάλλαξη (mutation) και αντιστροφή (inversion). Ο τελεστής της επιλογής κατατάσσει τα χρωμοσώματα σε ένα πλήθος

υποψηφίων διανυσμάτων για αναπαραγωγή. Η διασταύρωση επανασυνθέτει γενετικά υλικά μεταξύ δύο γονικών χρωμοσωμάτων για να δημιουργήσει δύο στοιχεία επόμενης γενιάς. Η μετάλλαξη αντικαθιστά τυχαία επιλεγμένα στοιχεία όταν κάποιο τεστ πιθανοτήτων είναι θετικό και η αντιστροφή αντιστρέφει την σειρά στην οποία έχουν καταταχθεί τα διανύσματα μεταξύ των δυο τυχαίων σημείων (Juste, Kita, et al. 1999).

- Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρουσιάστηκε από τους Kirkpatrick, Gela και Vecchi το 1982 και από τον Cerny το 1985, ξεχωριστά. Ο όρος ανόπτηση, κυριολεκτικά, αναφέρεται στην κατεργασία κατά την οποία θερμαίνεται ένα στερεό μέχρι μεγάλη θερμοκρασία και στην συνέχεια ψύχεται μειώνοντας την θερμοκρασία βηματικά (Wong and Wong, 1994). Έτσι, παρομοιάζοντας την ανοπτητική διαδικασία με τη βελτιστοποίηση, μπορεί να επιλυθεί ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων ακολουθώντας την διαδικασία μετάβασης από την κατάσταση ισορροπίας σε κάποια άλλη, καταλήγοντας στην κατώτατη ενέργεια. Το σχέδιο δράσης είναι η πιθανοτική επανεξέταση του χώρου του προβλήματος όπου η αποδοχή των νέων δειγμάτων στο τρέχον ελέγχεται από μια πιθανοτική συνάρτηση, η οποία όσο περνάει ο χρόνος λειτουργίας παρουσιάζει πιο αυστηρά όρια αποδοχής με βάση το κόστος. Παρόλο τον μεγάλο επεξεργαστικό χρόνο (CPU time) που απαιτείται παρουσιάζονται κάποια πλεονεκτήματα όπως η ανεξαρτησία από την αρχική λύση και η μαθηματική απλότητα (Mantawy, et al. 1998).

- Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming)

Η βασική ιδέα του εξελικτικού προγραμματισμού περιέχει την εξέλιξη πληθυσμών με αντικρουόμενους αλγορίθμους με σκοπό την ανάπτυξη τεχνητής νοημοσύνης (Fogel, et al. 1966). Με αυτή την τεχνική αναπτύσσεται δυνατή εξάρτηση ανάμεσα σε κάθε γονέα με το διάνυσμα της επόμενης γενιάς, σε επίπεδο των ειδών. Ουσιαστικά αποτελεί συνέχεια της θεωρίας των γενετικών αλγορίθμων και έχει ως στόχο να μεγιστοποιήσει την καταλληλότητα μιας συλλογής υποψηφίων λύσεων στο πλαίσιο μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτός ο στόχος επιδιώκεται με την χρήση ενός προσαρμοστικού μοντέλου με υποκατάστατα για τις διαδικασίες εξέλιξης (αναπαραγωγή με μεταβολή) κάτω από τον ανταγωνισμό. Η αναπαράσταση των υποψηφίων λύσεων μπορεί να εκτιμηθεί μέσω του κόστους ή της αντικειμενικής συνάρτησης.

- Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution)

Ο αλγόριθμος της Διαφορικής εξέλιξης περιλαμβάνει τη διατήρηση ενός πληθυσμού υποψηφίων λύσεων που υποβάλλονται σε επαναλήψεις με σκοπό την συνεχή εξέλιξη του εξεταζόμενου πληθυσμού. Τα κύρια βήματα – τελεστές που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία είναι η αρχικοποίηση (initialization), η μετάλλαξη (mutation), η διασταύρωση (crossover) και η επιλογή (selection). Κατά την διαδικασία επίλυσης δημιουργούνται συνεχώς δοκιμαστικά παραμετρικά διανύσματα από την

πρόσθεση σταθμισμένης διανυσματικής διαφοράς δύο μελών με ένα τρίτο μέλος. Εφαρμογή επίλυσης του ΠΕΜ με την συγκεκριμένη μέθοδο παρουσιάζεται στην εργασία του Τσαλαβούτη και των συνεργατών του ([Tsalavoutis, et al. 2016](#)).

1.2.4.3 Υβριδικοί Αλγόριθμοι (Hybrid Algorithms)

Οι υβριδικοί αλγόριθμοι αποτελούν συνδυασμό δύο ή περισσότερων μεθόδων είτε στοχαστικών είτε ντετερμινιστικών, ενσωματώνοντας τα πλεονεκτήματα αυτών για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων. Ο στόχος των υβριδικών προσεγγίσεων είναι η επιτάχυνση της σύγκλισης και η βελτίωση ποιότητας της λύσης σε σχέση με μεμονωμένες προσεγγίσεις. Μελετώντας την ανάλυση των επιμέρους τεχνικών επίλυση βγαίνει το συμπέρασμα πως κάποιες είναι σχετικά απλές αλλά καταλήγουν σε μη βέλτιστη λύση ενώ άλλες είναι πολύπλοκες αλλά ακριβείς. Μερικές προσεγγίσεις που προσπάθησαν να δώσουν λύση στο πρόβλημα ένταξης μονάδων παρουσιάζονται στην εργασία των Mallipeddi και Sugathan ([Mallipeddi and Sugathan, 2014](#)) και του B. Saravan και των συνεργατών του ([Saravanan, Das, et al. 2013](#)).

- Μεικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός (MINP)

Αποτελεί υποκατηγορία του Μεικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MILP) που βασίζεται στην αλληλουχία τριών βασικών βημάτων: α) Μετασχηματισμός του προβλήματος που βασίζεται στην θεωρία του Μεικτού Ακέραιου Κυρτού Προγραμματισμού (Mixed Integer Convex Programming), β) χρήση βελτιωμένης μεθόδου επίλυσης που συνδυάζει τις τεχνικές του Branch and Bound και του εσωτερικού σημείου (interior point method), γ) εφαρμογή στρατηγικών επιτάχυνσης για την μείωση υπολογιστικού χρόνου. ([Xie and Chiang, 2010](#)).

- Προσομοιωμένη ανόπτηση και Τετραγωνικός Προγραμματισμός

Ο συγκεκριμένος υβριδικός αλγόριθμος εφαρμόζει νέους κανόνες για την παραγωγή τυχαίων αρχικών εφικτών λύσεων για το πρόβλημα ένταξης μονάδων. Η προσομοιωμένη ανόπτηση χρησιμοποιείται για την επίλυση του υποπροβλήματος προγραμματισμού των μονάδων και ο τετραγωνικός προγραμματισμός για την οικονομική κατανομή (Economic Dispatch). Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως η ανεξαρτησία της λύσης από τις αρχικές τιμές και μαθηματική πολυπλοκότητα όμως απαιτεί αρκετό επεξεργαστικό χρόνο. ([Mantawy et al., 1998](#))

- Έμπειρα Συστήματα με μαθηματικό προγραμματισμό

Τα έμπειρα συστήματα με ενσωμάτωση μαθηματικού προγραμματισμού, όπου η τυφλή αναζήτηση που πραγματοποιεί ο ΕΣ σε μια μεγάλη σειρά πιθανών λύσεων αντικαθίσταται με αναζήτηση σε ένα μικρό εύρος λύσεων σε συνδυασμό με την τεχνική του μαθηματικού προγραμματισμού. Με κάποιο από τις προηγούμενες μορφές ενεργειακού χρονοδιαγράμματος ως αρχική λύση, μπορεί να επιτευχθεί μια νέα λύση που ικανοποιεί τις ανάγκες φορτίου με χρήση της Λίστας Προτεραιοτήτων. ([Tong et al., 1991](#))

- Υβριδική βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (Hybrid ant colony optimization)

Ο Yu και οι συνεργάτες του (Yu, et al. 2010) δημιούργησαν το 2010 την υβριδική μέθοδο της αποικίας μυρμηγκιών συνδυάζοντας τον αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών (Ant colony search algorithm) για τον προσδιορισμό της μεταβλητής κατάστασης κάθε μονάδας και την τεχνική των Επαναλήψεων Λάμδα (Lambda Iteration) για την οικονομική κατανομή του φορτίου (Economic Dispatch). Για την επαλήθευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα 10 μονάδων (Kazarlis, et al. 1996).

- Υβριδική Λαγκραντζιανή Χαλάρωση (Hybrid Lagrangian relaxation)

Ο Zhang και οι συνεργάτες του (Zhang, et al. 2009) ανέπτυξαν τον συγκεκριμένο αλγόριθμο, συνδυάζοντας την Λαγκραντζιανή χαλάρωση (Lagrangian Relaxation) για την επίλυση μεγάλης κλίμακας συστημάτων και γενετικό αλγόριθμο (Genetic Algorithm) για την διόρθωση των ελλείψεων που δημιουργούνται από την χρήση Δυναμικού Προγραμματισμού (Dynamic Programming). Ο ρυθμός σύγκλισης είναι σχετικά γρήγορος και καταλήγει σε καλής ποιότητας λύση.

- Υβριδικός Γενετικός Αλγόριθμος (Hybrid GA)

Οι Chang και Luo (Chang and Luo, 2008) χρησιμοποίησαν τον δυαδικό γενετικό αλγόριθμο ενσωματώνοντας μία λύση που έχει προκύψει μέσω της λίστας προτεραιότητας. Ουσιαστικά η λύση που χει παραχθεί, εισάγεται στον GA ως αρχικός πληθυσμός και στην συνέχεια εξάγεται μια ολική λύση. Ο υβριδικός γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε σε σύστημα 10 μονάδων και κατάφερε να φτάσει σε καλύτερη λύση σε σχέση με τις επιμέρους μεθόδους που συνδυάζει.

- Μιμητικός αλγόριθμος (Memetic Algorithm)

Ο Μιμητικός Αλγόριθμος είναι συνδυασμός ενός γενετικού αλγορίθμου με χρήση τοπικών αναζητήσεων που εφαρμόζονται στην περίπτωση όπου το εξεταζόμενο σημείο αποτελεί καλύτερη λύση από την ήδη υπάρχουσα. Ο στόχος της στρατηγικής επεξεργασίας πληροφοριών είναι να εκμεταλλευτεί μια τεχνική ολικής αναζήτησης για την εύρεση περιοχών με αξιόλογη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, σε συνδυασμό με την εφαρμογή ευρετικών μηχανισμών για το εντοπισμό των επιμέρους τοπικών βέλτιστων. (Yamin 2004)

1.3 Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (Mixed Integer Linear Programming)

1.3.1 Εισαγωγή

Ο Μεικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (Mixed Integer Linear Programming, ΜΑΓΠ) αποτελεί μια ιδιαίτερα εύχρηστη μέθοδο μοντελοποίησης προβλημάτων που έχει αναπτυχθεί σημαντικά και αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι των κλάδων των επιχειρήσεων και της τεχνολογίας. Στις αρχές ανάπτυξης του, παρόλη την αρτιότητα που χαρακτήριζε το μαθηματικό μοντέλο του εκάστοτε προβλήματος τα υπολογιστικά συστήματα της εποχής δεν ήταν ικανά να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες επίλυσης οπότε χαρακτηριζόταν ως πρακτικά ανέφικτα. Τα τελευταία όμως χρόνια με την ευρεία ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων κατέστη εφικτός τρόπος προσέγγισης σύνθετων και μεγάλης κλίμακας προβλημάτων (πχ. Unit Commitment Problem) το οποίο οδήγησε και στην εξέλιξη των επιλυτών που χρησιμοποιούνται πλέον ευρύτατα σε βιομηχανικό επίπεδο (πχ. CPLEX).

Η θεωρία του ΜΑΓΠ (MILP) αποτελεί υποκατηγορία του Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming, ΓΠ), ο οποίος θα αναλυθεί στην συνέχεια, και ενσωματώνει αρκετά από τα πλεονεκτήματά του. Προφανώς ως υποσύνολο διατηρεί άμεση σχέση με την ανάπτυξη του ΓΠ καθώς κάνει χρήση των επιλυτών του (πχ. Simplex). Παράλληλα περιορίζεται ως προς την μοντελοποίηση του εκάστοτε προβλήματος, καθώς διατηρεί γραμμικές εκφράσεις για την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς, που όμως μέσω προσεγγίσεων και μεθόδων γραμμικοποίησης ανώτερης τάξης καμπυλών επιτυγχάνεται ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

1.3.2 Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming)

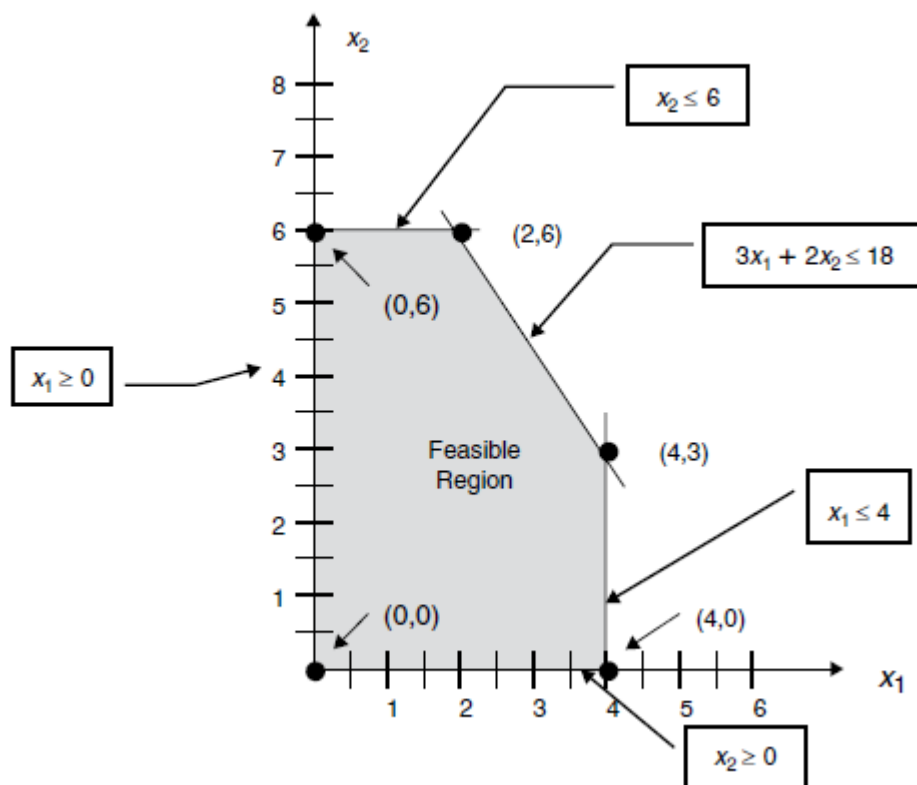
Ο γραμμικός προγραμματισμός αποτελεί μία από τις ευρύτερα διαδεδομένες τεχνικές μοντελοποίησης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιείται σε πολλά προβλήματα είτε είναι καθαρά γραμμικά (ως προς τους όρους την αντικειμενικής συνάρτησης και τους περιορισμούς), είτε σε μη γραμμικά τα οποία υπόκεινται σε γραμμικοποίηση. Το κύριο πλεονέκτημα του ΓΠ(LP) είναι η δυνατότητα να διαχειρίζεται εξισώσεις και ανισώσεις στους περιορισμούς. Κυριότερες εφαρμογές σε ενεργειακό επίπεδο είναι η οικονομική κατανομή φορτίου (economic dispatch) και προγραμματισμός υδροηλεκτρικών ή προβλημάτων τροφοδοσίας καυσίμου.

- Γραφική επίλυση

Για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού είναι δυνατή η χρήση γραφικής μεθόδου όπου ουσιαστικά η αντικειμενική συνάρτηση και οι διάφοροι περιορισμοί ορίζουν μία εφικτή περιοχή μέσα στην οποία βρίσκεται η βέλτιστη λύση. Πάντοτε στους περιορισμούς περιέχεται η μη αρνητικότητα των μεταβλητών ώστε η

εφικτή περιοχή να βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως το ζητούμενο βρίσκεται σε γωνιακό σημείο του χώρου των λύσεων (σημείο τομής ευθειών για τις δύο διαστάσεις). Συνήθως, γραφικά επιλύονται σχετικά απλά προβλήματα.

Ένα παράδειγμα της γραφικής μεθόδου παρατίθεται παρακάτω.



Σχήμα 1-11: Παράδειγμα επίλυσης προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού

- Αλγόριθμος Simplex

Για την επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων με περισσότερες μεταβλητές συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Simplex. Πρόκειται για μια επαναληπτική μέθοδο βελτιστοποίησης η οποία στηρίζεται στην γεωμετρική λύση αλλά μέσω μηχανιστικής προσέγγισης μπορεί να αυτοματοποιηθεί ώστε η διαδικασία να πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Προϋπόθεση χρήσης του αλγορίθμου είναι το πρόβλημα να έχει αναχθεί σε πρότυπη μορφή, δηλαδή οι μεταβλητές να είναι μη αρνητικές, οι σταθεροί όροι των περιορισμών μη αρνητικοί και οι περιορισμοί να είναι ισότητες.

1.3.3 Βελτιστοποίηση με την χρήση Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Optimization)

Η θεωρία του γραμμικού προγραμματισμού επιλύει αρκετά προβλήματα τα οποία ωστόσο ανάγονται σε επιμέρους κατηγορίες. Η κύρια διαφοροποίηση εντοπίζεται στις μεταβλητές απόφασης. Σε ένα κλασσικό συνεχές πρόβλημα οι μεταβλητές ικανοποιούν τον περιορισμό διαιρετότητας άρα μπορούν να πάρουν και μη ακέραιες τιμές αναζητώντας την βέλτιστη λύση. Σε περίπτωση που όλες οι μεταβλητές απόφασης περιορίζονται να πάρουν ακέραιες τιμές τότε ανήκουν στο πεδίο του ακέραιου προγραμματισμού (Integer Programming), ενώ όταν είναι ακέραιες κάποιες από αυτές επιλύονται μέσω της θεωρίας του Μεικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming). Η ακεραιότητα συνήθως εκφράζει φυσικές ποσότητες οι οποίες βρίσκονται αδιαίρετες στην φύση (πχ. πλήθος αντικειμένων, ατόμων) ή και την δυαδικότητα σε περίπτωση μεταβλητής κατάστασης (πχ. λειτουργία μονάδων παραγωγής στο πρόβλημα ένταξης μονάδων).

Η γενική μορφή που ακολουθούν τα προβλήματα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού είναι η παρακάτω:

$$\begin{aligned} \min_{(x,y)} & c_x^T x + c_y^T y \\ \text{s. t.} & Ax + By \leq 0 \quad (P_o) \\ & x \geq 0 \\ & y \in \{0,1\}^q \end{aligned}$$

Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων υπάρχει μεγάλη ποικιλία τεχνικών μεθόδων οι οποίες διαιρούνται κυρίως πρωτεύουσες (primal) και δυικές (dual). Μια τυπική (δυική) προσέγγιση αποτελεί η τεχνική περιορισμού του εφικτού χώρου (Cutting Plane Method), όπου το πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού χρησιμοποιείται για την κατασκευή μιας ακολουθίας γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Τα υποπροβλήματα προκύπτουν από την διαδοχική προσθήκη γραμμικών περιορισμών που εκφράζουν τα επίπεδα περιορισμού του χώρου έως ότου η βέλτιστη λύση ενός γραμμικού υποπροβλήματος να ικανοποιεί και τους περιορισμούς ακεραιότητας. Για πληθώρα συνδυαστικών προβλημάτων, είναι δυνατή η παραγωγή αρκετών περιορισμών του εφικτού χώρου εκμεταλλευόμενη την συνδυαστική δομή του προβλήματος. Στην περίπτωση των γενικών MILP ωστόσο, η παραγωγή των εν λόγω περιορισμών βασίζεται στην αντικειμενική συνάρτηση και στις γραμμικές ισότητες και ανισότητες και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι σε γεωμετρικές μεθόδους. Αντίστοιχα, σημαντικό ρόλο παίζει η μέθοδος Branch and Bound, οι ευρετικοί αλγόριθμοι όπως και οι μέθοδοι προεπεξεργασίας.

1.3.3.1 Αναδρομή σε μεθόδους επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με Μεικτό Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (Mixed Integer Linear Programming solution of Unit Commitment Problem)

Η επιστημονική κοινότητα καθ' όλη την εξέλιξη της θεωρίας του Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού έδειξαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην ανάπτυξη μοντέλων επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων παρουσιάζοντας διάφορες προσεγγίσεις ως προς την οπτική του προβλήματος (μονάδες, αξιοπιστία του συστήματος, εκπομπές στο περιβάλλον, ένταξη ανανεώσιμων έναντι συμβατικών μηχανών) καθώς και διαφορές στην μαθηματική προσέγγιση όπως η γραμμικοποίηση των μη γραμμικών εκφράσεων τους κόστους, στον αριθμό των ακεραίων μεταβλητών, κόστη εκκίνησης και αποσύνδεσης. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια αναδρομή στα σημαντικότερα μοντέλα που παρουσιάστηκαν από την αρχή της μελέτης του συγκεκριμένου προβλήματος.

- Η πρώτη προσέγγιση με χρήση ΜΑΓΠ (MILP) για την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων (UCP) έγινε από τον T. Dillon και τους συνεργάτες του το 1978 (Dillon, et al.1978). Η διατύπωση του προβλήματος βασιζόταν στην έκφραση τριών δυαδικών μεταβλητών οι οποίες εξέφραζαν αντίστοιχα, την εκκίνηση (startup), την αποσύνδεση (shutdown) και την κατάσταση λειτουργίας (on/off states) για κάθε μονάδα σε κάθε χρονική περίοδο. Ως επιλύτης χρησιμοποιήθηκε μια εκτεταμένη και διαμορφωμένη έκδοση του αλγορίθμου Branch and Bound.
- Το παραπάνω μοντέλο του Dillon (Dillon, et al.1978) επεκτάθηκε από τους Arroyo και Conejo (Arroyo and Conejo, 2000) για την διαμόρφωση του προβλήματος του αυτο-προγραμματισμού (self-scheduling) που αντιμετωπίζει μια μονάδα στην αγορά ηλεκτρική ενέργειας. Η ένταξη μη κυρτών εκφράσεων κόστους παραγωγής (nonconvex production costs), χρονικά εξαρτώμενου κόστους εκκίνησης (time dependent startup costs), περιορισμών που παρεμβάλλονται μεταξύ των περιόδων όπως τα όρια κλίσης (ramping limits) και της χρονικής διάρκειας ελάχιστης λειτουργίας και ελάχιστης κράτησης (minimum up/down times) συνέβαλαν στην αύξηση του αριθμού των δυαδικών μεταβλητών.
- Οι M. Nowak και W. Romisch (Nowak and Romisch, 2000) παρουσίασαν μια προσέγγιση με γραμμικές εκφράσεις για τα κόστη εκκίνησης (startup costs) και την χρονική διάρκεια ελάχιστης λειτουργίας και κράτησης (minimum up/down times) με την απαίτηση μιας δυαδικής μεταβλητής απόφασης. Ωστόσο, το μοντέλο δεν λάμβανε υπόψη τα όρια κλίσης (ramping limits) και την επιρροή τους στους περιορισμούς της στρεφόμενης εφεδρείας (spinning reserve constraints) ούτε και κόστη αποσύνδεσης για κάθε μονάδα (shutdown costs).

- Οι M. Carrión και J. Arroyo (Carrión and Arroyo, 2006) δημοσίευσαν ένα εναλλακτικό μοντέλο επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων (MILP-UC) που χρησιμοποιεί μια δυαδική μεταβλητή που εκφράζει την κατάσταση λειτουργίας για κάθε μονάδα παραγωγής, κάθε περίοδο λειτουργίας. Αντιθέτως με τα παραπάνω μοντέλα, ο μικρότερος αριθμός των απαιτούμενων δυαδικών μεταβλητών στο MILP-UC αποφέρει μείωση στον αριθμό των κόμβων του δένδρου αναζήτησης που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο branch-and-cut, όπως και μείωση στον αριθμό των περιορισμών, οδηγώντας σε μείωση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται. Ως συνέπεια, το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ικανό να παρουσιάζει με ακρίβεια την κατάσταση των μονάδων όπως και να εντάσσει διαχρονικούς περιορισμούς, χρονικά εξαρτώμενο κόστος εκκίνησης βελτιώνοντας την ικανότητα μοντελοποίησης και διατηρώντας ταυτόχρονα μια αρκετά εύχρηστη και απλή μαθηματική έκφραση για τον χρήστη. Άλλες εφαρμογές του είναι τα προβλήματα προγραμματισμού που προκύπτουν στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως πχ. εκκαθαριστικές διαδικασίες της αγοράς επιλύσιμες από τα ISO, αυτο-προγραμματιζόμενα προβλήματα που επιλύονται από εταιρίες παραγωγής για την εξαγωγή στρατηγικών προσφορών και τέλος προσομοιωτές αγοράς που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς των συμμετεχόντων στην αγορά. Ο αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα εύχρηστος και βρίσκει εφαρμογές σε πρακτικά μεγάλης κλίμακας προβλήματα με τα τελικά αποτελέσματα που παρουσιάζει ωστόσο να μην περιέχουν τα όρια κλίσης που παρουσιάζει στο μαθηματικό μοντέλο.
- Οι G. Chang και J. Waight περιγράφουν στην σχετική εργασία τους (Chang and Waight, 1999) ένα μοντέλο επίλυσης του προβλήματος ένταξης υδροηλεκτρικών μονάδων (Hydro Unit Commitment Problem). Το αναπτυγμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προγραμματισμού χρονοδιαγραμμάτων μισής ώρας για τις διαθέσιμες υδροηλεκτρικές μονάδες, για περιόδους μελέτης ορισμένες από τον εκάστοτε χρήστη, με παράλληλη τήρηση των υδραυλικών περιορισμών του συστήματος. Στόχο του αλγορίθμου αποτελεί η μεγιστοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας σε κάθε δεξαμενή, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται το άθροισμα του κόστους ποινής που σχετίζεται με τις παραβιάσεις του ορίου στάθμης των δεξαμενών και με το κόστος εκκίνησης κάθε μονάδας. Ως δεδομένα εισόδου ορίζεται η αξία του νερού της δεξαμενής, ο στόχος του επιπέδου στάθμης και το κόστος παραβιάσεων. Για τον έλεγχο του αλγορίθμου γίνεται χρήση πραγματικών δεδομένων υδροηλεκτρικού συστήματος και για την επίλυση του το πρόγραμμα CPLEX, εξάγοντας το συμπέρασμα πως είναι κατάλληλος και για ανταγωνιστικές εφαρμογές στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με υδροδυναμικά συστήματα ισχύος.
- Ο A. Frangioni και οι συνεργάτες του (Frangioni, et al. 2009) παρουσίασαν μια μελέτη επίλυσης του προβλήματος βραχυπρόθεσμης ένταξης μονάδων στην υδροθερμική παραγωγή ενέργειας. Η προσέγγιση της μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης πραγματοποιείται βάσει της θεωρίας των "perspective cuts", δηλαδή μιας σειράς έγκυρων ανισοτήτων. Σύμφωνα με

τους συγγραφείς επιτυγχάνεται η επίλυση γενικών προβλημάτων ένταξης μονάδων με περισσότερη ακρίβεια και αποδοτικότητα χωρίς να αυξάνεται η δυσκολία μοντελοποίησης σε σχέση με την κλασική γραμμικοποίηση με χρήση τμηματικά γραμμικής συνάρτησης. Η δυναμική σύνθεση, όπου το επιτρεπόμενο εύρος της προσέγγισης βελτιώνεται διαδοχικά, παρέχει καλύτερο αποτέλεσμα εφόσον υπάρχει κατάλληλος έλεγχος του επιπέδου σύγκλισης.

- Ο G. Morales - Espana και οι συνεργάτες του (Morales, et al. 2013) δημοσίευσαν μία αυστηρότερη (tight) μορφοποίηση του προβλήματος (σχετικά με την απόκλιση των ακεραίων και των υπό χαλάρωση λύσεων) μειώνοντας τον χώρο αναζήτησης και ταυτόχρονα πιο συμπαγή (compact, σχετικά με την ποσότητα των προς επεξεργασία δεδομένων) αυξάνοντας την ταχύτητα αναζήτησης με την οποία οι επιλύτες διερευνούν τον μειωμένο χώρο. Ως συνέπεια, σύμφωνα με τους συγγραφείς, μειώνεται σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους ΜΑΓΠ. Για την επαλήθευση την μεθόδου παρουσιάζεται πληθώρα των συνηθισμένων εφαρμογών είτε με μια μεταβλητή απόφασης, είτε με τρεις όπως και διαφορετικές εκφράσεις κόστους εκκίνησης των μονάδων παραγωγής.
- Ο L. Wu (Wu 2011) δημοσίευσε μια εργασία επίλυσης του ΠΕΜ στην οποία οι τετραγωνικές συναρτήσεις κόστους προσεγγίζονται με αυστηρότερο τρόπο σε σχέση με την τμηματική γραμμική συνάρτηση που αποτελεί την διαδεδομένη μέθοδο. Παραδοσιακά, η συνάρτηση χωρίζεται κατά ίσα τμήματα που διαιρούν την περιοχή ισχύος. Η αυστηρότερη μέθοδος κατανομής τμημάτων λειτουργεί ελαχιστοποιώντας τη διαφορά χορδής και μήκους τόξου κάθε επιμέρους καμπύλης με σκοπό την εύρεση βέλτιστου αριθμού τμημάτων, καλύτερης προσέγγισης της συνάρτησης και καλύτερη λύση στο ζητούμενο πρόβλημα.
- Οι A. Viana και J. P. Pedroso (Viana and Pedroso, 2013) παρουσίασαν μια από τις σημαντικότερες εργασίες επίλυσης του τυπικού προβλήματος ένταξης μονάδων με χρήση ΜΑΓΠ. Ο αλγόριθμος θεωρεί τμηματικές γραμμικές προσεγγίσεις της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους καυσίμου, με το πλήθος αυτών να αυξομειώνεται δυναμικά με επαναληπτικό τρόπο συγκλίνοντας προς το βέλτιστο. Ως συνέπεια, αποφεύγεται η χρήση της τετραγωνικής έκφρασης μετά τον προγραμματισμό των μονάδων και καθίσταται η διαδικασία επίλυσης αρκετά γρηγορότερη. Ύστερα από δοκιμές σε ευρύ φάσμα παραλλαγών του προβλήματος, ο αλγόριθμος αποδείχθηκε ικανός και ευέλικτος ως προς την ενσωμάτωση διαφορετικών περιορισμών ανάλογα με την οπτική επίλυσης. Για παράδειγμα, είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς κλίσης, που παρόλη την πολύ μεγάλη σημασία τους εξαταζόντουσαν σπάνια στις προγενέστερες προσεγγίσεις. Η σημαντικότερη και επαναστατική προσθήκη του αλγορίθμου στην διεθνή βιβλιογραφία είναι η εξαγωγή βέλτιστων λύσεων για πληθώρα περιπτώσεων, που χρησιμοποιούνται ευρέως ως σημεία αναφοράς (benchmarks) ακόμα και σήμερα. Σε αυτές περιλαμβάνονται περιπτώσεις πρακτικής σημασίας και

ιδιαίτερα μεγάλα συστήματα, των οποίων η βέλτιστη λύση δεν ήταν ακόμα γνωστή. Η μοντελοποίηση της μεθόδου τους έγινε σε γλώσσα AMPL (A Modelling Language for Mathematical Programming) και η επίλυση σε CPLEX.

1.3.3.2 Πλεονεκτήματα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων

Σύμφωνα με τον Chang και τους συνεργάτες του (Chang, et al. 2004) η επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων (UCP) με χρήση ΜΑΓΠ παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Ο χρόνος επίλυσης είναι σημαντικά μικρότερος από άλλες μεθόδους
- Καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός της απόκλισης από την βέλτιστη λύση
- Οι μη γραμμικοί περιορισμοί είναι εύκολο να γραμμικοποιηθούν
- Το επιλύσιμο πρόβλημα μπορεί να είναι μεγάλης κλίμακας
- Οι σκιάδεις τιμές (dual values) των σχετικών περιορισμών παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες τιμολόγησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη στρατηγικών σχετικά με την υποβολή προσφορών στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

2. Μαθηματικό μοντέλο

2.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της ενεργειακής βιομηχανίας οδηγεί συνεχώς στην δημιουργία ενός ανταγωνιστικού περιβάλλοντος το οποίο απαιτεί αποτελεσματικότερα και ακριβέστερα εργαλεία για τη υποστήριξη των αποφάσεων για τον προγραμματισμό διαχείρισης ενεργειακών πόρων. Το πρόβλημα ένταξης θερμικών μονάδων (Thermal Unit Commitment Problem) παραδοσιακά επιλύεται για κεντρικά συστήματα ισχύος με σκοπό τον καθορισμό του πότε η κάθε μονάδα συνδέεται ή αποσυνδέεται από το σύστημα και αντίστοιχα τα ποσά ισχύος που παράγονται σε κάθε χρονική περίοδο ικανοποιώντας την πρόβλεψη για την ζήτηση του δικτύου. Ταυτόχρονα πρέπει να ικανοποιούνται οι διάφοροι περιορισμοί που αφορούν την στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve), τα όρια παραγωγής, κλίσης (ramp up/down limits), ελάχιστης λειτουργίας (minimum up-time) και ελάχιστης κράτησης (minimum down-time) σε μια συγκεκριμένη βραχυπρόθεσμη περίοδο με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας. Η προσέγγιση του Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) τα τελευταία χρόνια αποτελεί μια αρκετά διαδεδομένη λύση η οποία κατέστη συμφέρουσα με την ραγδαία άνοδο της υπολογιστικής δύναμης των συστημάτων αλλά και με την ανάπτυξη αποδοτικών επιλυτών. Το κυριότερο πλεονέκτημα της είναι ο προσδιορισμός της σύγκλισης που επιτυγχάνεται σε σχέση με την βέλτιστη λύση σε ένα πεπερασμένο πλήθος βημάτων παρέχοντας ένα ευέλικτο και ακριβές πλαίσιο μοντελοποίησης. Στην συγκεκριμένη εργασία, επιλύεται το πρόβλημα ένταξης μονάδων με χρήση Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού με χρήση μιας δυαδικής μεταβλητής κατάστασης που εκφράζει για κάθε περίοδο ποιες μονάδες του συστήματος είναι σε κατάσταση λειτουργίας. Το σύστημα αποτελείται από καθορισμένο αριθμό μονάδων παραγωγής ισχύος και το χρονικό πλαίσιο χωρίζεται σε 24 ωριαίες χρονικές περιόδους.

2.2 Συμβολισμός βασικών μεγεθών

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τους συμβολισμούς των βασικών μεγεθών που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος. Τα μεγέθη χωρίζονται σε σταθερές οι οποίες είναι δοσμένες από το εκάστοτε case study που χρησιμοποιείται και σε μεταβλητές οι οποίες προκύπτουν μέσα από την διαδικασία επίλυσης.

- Σταθερές

Πίνακας 2-1: Σταθερές μαθηματικού μοντέλου

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
A_i	Συντελεστής της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής για την μονάδα i	(\$)
a_i, b_i, c_i	Συντελεστές της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους παραγωγής της μονάδας i	(\$/h), (\$/MWh), (\$/MW ² h)
cc_i	Κόστος εκκίνησης της μονάδας από την ψυχρή κατάσταση.	(\$/h)
$D(j)$	Ζήτηση δικτύου την περίοδο j	(MW)
DT_i	Ελάχιστος χρόνος κράτησης της μονάδας i	(h)
$F_{l,i}$	Κλίση του τμήματος l της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής της μονάδας i	(\$/MW)
G_i	Αριθμός περιόδων για τις οποίες η μονάδα i πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας λόγω του περιορισμού του ελάχιστου χρόνου λειτουργίας	-
hc_i	Κόστος εκκίνησης της μονάδας από τη θερμή κατάσταση.	(\$/h)
K_i^t	Κόστος του διαστήματος t της βηματικής (stairwise) συνάρτησης κόστους εκκίνησης της μονάδας i	(\$)
L_i	Αριθμός περιόδων για τις οποίες η μονάδα i πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση κράτησης λόγω του περιορισμού του ελάχιστου χρόνου κράτησης	-
ND_i	Αριθμός διαστημάτων της βηματικής (stairwise) συνάρτησης κόστους εκκίνησης της μονάδας i	-
NL_i	Αριθμός τμημάτων της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής της μονάδας i	-

P_i^{cap}	Χωρητικότητα της μονάδας i	(MW)
P_i^{min}	Ελάχιστη παραγωγή ισχύος της μονάδας i	(MW)
$R(j)$	Προϋπόθεση στρεφόμενης εφεδρείας στην περίοδο j	(MW)
RD_i	Όριο κλίσης (ramp-down) της μονάδας i	(MW)
RU_i	Όριο κλίσης (ramp-up) της μονάδας i	(MW)
S_i^0	Αριθμός περιόδων όπου η μονάδα i ήταν σε κατάσταση εκτός λειτουργίας πριν από την πρώτη περίοδο του χρονικού διαστήματος	-
SD_i	Όριο κλίσης τερματισμού λειτουργίας (shutdown ramp limit) της μονάδας i	(MW)
SU_i	Όριο κλίσης εκκίνησης λειτουργίας (startup ramp limit) της μονάδας i	(MW)
t_{cold}^i	Χρόνος μετάβασης της μονάδας από τη 'θερμή' στην 'ψυχρή' κατάσταση	(h)
T	Αριθμός περιόδων του χρονικού πλαισίου	-
$T_{l,i}$	Ανώτερο όριο του τμήματος l της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής της μονάδας i	(MW)
U_i^0	Αριθμός περιόδων όπου η μονάδα i ήταν σε κατάσταση λειτουργίας πριν από την πρώτη περίοδο του χρονικού διαστήματος	-
UT_i	Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας την μονάδας i	(h)
$V_i(0)$	Αριθμός περιόδων όπου η μονάδα i ήταν σε κατάσταση κράτησης πριν από την πρώτη περίοδο του χρονικού διαστήματος	-

- **Μεταβλητές**

Πίνακας 2-2: Μεταβλητές μαθηματικού μοντέλου

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
$c_i^p(j)$	Κόστος παραγωγής της μονάδας i την περίοδο j	(\$)
$c_i^u(j)$	Κόστος εκκίνησης της μονάδας i την περίοδο j	(\$)
$p_i(j)$	Ποσό ισχύος που παράγεται από την μονάδα i την χρονική περίοδο j	(MW)
p_i^{max}	Μέγιστο διαθέσιμο ποσό ισχύος που μπορεί να παραχθεί από την μονάδα i την χρονική περίοδο j	(MW)
$v_i(j)$	Δυαδική μεταβλητή κατάστασης που ισούται με 1 όταν η μονάδα i είναι σε κατάσταση λειτουργίας και με 0 όταν είναι εκτός λειτουργίας	-
$\delta_i(i, j)$	Ποσό ισχύος που παράγεται στο τμήμα I της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης παραγωγής του unit I την περίοδο j	(MW)

2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ένταξης μονάδων (UCP) με μεικτό ακέραιο προγραμματισμό (MILP)

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων εκφράζεται μέσω μοντέλου Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) με αποτέλεσμα όλες οι εκφράσεις των μεταβλητών καθώς και των περιορισμών να είναι απαραίτητα γραμμικές. Για την μοντελοποίηση με αυτή την μορφή, γίνεται χρήση της εργασίας των Carrion και Arroyo (Carrion and Arroyo, 2006). Σε αντίθεση με τις συνηθισμένες προσεγγίσεις υπάρχει μια μοναδική δυαδική μεταβλητή κατάστασης, που εκφράζει το αν η κάθε μονάδα είναι σε λειτουργία για κάθε χρονική περίοδο μειώνοντας το υπολογιστικό κόστος.

2.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει το συνολικό κόστος που απαρτίζεται από τους επιμέρους όρους κόστους παραγωγής και εκκίνησης της κάθε μονάδας για κάθε περίοδο οι οποίοι ελαχιστοποιούνται ως άθροισμα.

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_i^p(j) + c_i^u(j) \quad (2.3.1)$$

Οι όροι αυτοί αναλύονται ως εξής:

- **Κόστος παραγωγής (Production Cost)**

Το κόστος παραγωγής στην γενική περίπτωση δίνεται από την τετραγωνική έκφραση:

$$c_i^p(j) = a_i v_i(j) + b_i p_i(j) + c_i p_i^2(j), \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.2)$$

Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω Σχήμα (2-1) η έκφραση του κόστους παραγωγής μπορεί να γραμμικοποιηθεί μέσω μιας τμηματικής γραμμικής συνάρτησης. Πρακτικά, η γραμμική προσέγγιση θεωρείται αποδεκτή εφόσον γίνει χρήση ικανού αριθμού τμημάτων (Li, Johnson and Svoboda, 1997).

Επομένως προκύπτει η πρόταση,

$$c_i^p(j) = A_i v_i(j) + \sum_{l=1}^{NL_i} F_{l,i} \delta_l(i,j), \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.3)$$

$$A_i = a_i + b_i P_i^{\min} + c_i P_i^{\min^2}(j), \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.4)$$

Αντίστοιχα για την **παραγόμενη ισχύ** κάθε μονάδας έχουμε την παρακάτω εξίσωση.

$$p_i(j) = \sum_{l=1}^{NL_i} \delta_l(i,j) + P_i^{\min} v_i(j), \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.5)$$

Για την γραμμικοποιημένη έκφραση της παραγόμενης ισχύος διαιρείται το διάστημα ($P_i^{\text{cap}} - P_i^{\text{min}}$) σε τόσα διαστήματα όσα και τα τμήματα της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης παραγωγής (Piecewise Linear Production Cost Function) και υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς.

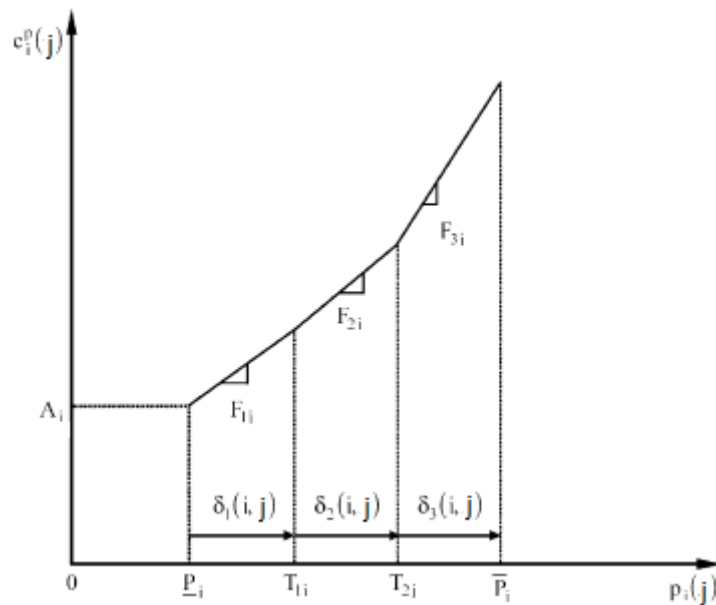
$$\delta_1(i, j) \leq T_{1i} - P_i^{min}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.6)$$

$$\delta_l(i, j) \leq T_{l,i} - T_{l-1,i}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall l = 2 \dots NL_i \quad (2.3.7)$$

$$\delta_{NL_i}(i, j) \leq P_i^{max} - T_{NL_i-1,i}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.8)$$

$$\delta_l(i, j) \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.9)$$

Στο Σχήμα (2-1) φαίνεται η απεικόνιση της παραπάνω γραμμικοποίησης για 3 τμήματα (segments).



Σχήμα 2-1: Τμηματική γραμμική συνάρτηση κόστους παραγωγής (piecewise linear production cost function)

(πηγή, Arroyo and Conejo 2006)

- **Κόστος Εκκίνησης (Startup Cost)**

Το κόστος εκκίνησης στην γενική περίπτωση εκφράζεται από μια εκθετική συνάρτηση. Για την γραμμικοποιημένη έκφραση γίνεται διακριτοποίηση των τιμών του κόστους στις διακριτές χρονικές περιόδους και προσαρμόζεται σε μια βηματική (stairwise) συνάρτηση που είναι πιο ακριβής όσο αυξάνεται ο αριθμός των διαστημάτων (intervals). Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται δύο διαφορετικές τιμές που αντιστοιχούν σε ψυχρή (cold) και θερμή (hot) εκκίνηση και διαμορφώνονται με βάση τις ώρες κατά τις οποίες η μονάδα ήταν σε κατάσταση εκτός λειτουργίας. Η μεικτή ακέραια γραμμική έκφραση προκύπτει από την παρακάτω ανισότητα (Nowak and Römisich, 2000).

$$c_i^u(j) \geq K_i^t [v_i(j) - \sum_{n=1}^t v_i(j-n)], \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall t = 1 \dots ND_i \quad (2.3.10)$$

$$c_i^u(j) \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (2.3.11)$$

Η Ανισότητα (2.3.10) αποτελεί μια ιδιαίτερα εύχρηστη έκφραση του κόστους εκκίνησης που χρησιμοποιείται σε πληθώρα επιστημονικών εργασιών, ανεξάρτητα από τον αριθμό των δυαδικών μεταβλητών του εκάστοτε μοντέλου.

Στην μη γραμμική έκφραση το κόστος εκκίνησης μοντελοποιείται ως:

$$c_i^u(j) = \begin{cases} hc_i, & \text{if } t_i^{off}(j) \leq t_i^{cold} + DT_i \\ cc_i, & \text{if } t_i^{off}(j) > t_i^{cold} + DT_i \end{cases} \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (2.3.12)$$

Εν συνεχεία ανάγεται στην βηματική (stairwise) συνάρτηση με σταθερές:

$$K_i^t = \begin{cases} hc_i, & \text{if } t = 1 \dots t_i^{cold} + DT_i \\ cc_i, & \text{if } t = t_i^{cold} + DT_i + 1 \dots ND_i \end{cases} \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (2.3.13)$$

Επομένως η Ανισότητα (2.3.10) κάνει χρήση των σταθερών οι οποίες παίρνουν ουσιαστικά 2 τιμές και καλύπτουν συγκεκριμένο εύρος ωρών εκτός λειτουργίας για κάθε μονάδα εντός των ορίων του $[1, ND_i]$. Η ανισοτική έκφραση χωρίς να υπολογίζει τις ώρες εκτός λειτουργίας πραγματοποιεί μια «προς τα πίσω» αναζήτηση στο πίνακα των δυαδικών μεταβλητών κατάστασης. Παράδειγμα της διεργασίας απεικονίζεται παρακάτω η οποία πραγματοποιείται για κάθε χρονική περίοδο, για τις διάφορες πιθανές ώρες εκτός λειτουργίας για κάθε μονάδα δημιουργώντας έναν πίνακα διαστάσεων $(ND_i \times I \times J)$. Στην περίπτωση που έχει ανοίξει μια μονάδα εντός των εξεταζόμενων περιόδων και το άθροισμα των μεταβλητών κατάστασης είναι αρνητικό υπερισχύει ο Περιορισμός (2.3.11).

$$\begin{aligned} c_i^u(j) &\geq K_i^1 [v_i(j) - v_i(j-1)] \\ c_i^u(j) &\geq K_i^2 [v_i(j) - v_i(j-1) - v_i(j-2)] \\ &\vdots \\ c_i^u(j) &\geq K_i^{ND_i} [v_i(j) - \sum_{n=1}^{ND_i} v_i(j-n)] \end{aligned} \quad (2.3.14)$$

2.3.2 Περιορισμοί

- **Κάλυψη της ζήτησης και στρεφόμενη εφεδρεία**

$$\sum_{j \in J} p_i(j) = D(j) , \forall j \in J \quad (2.3.15)$$

$$\sum_{j \in J} p_i^{max}(j) \geq D(j) + R(j) , \forall j \in J \quad (2.3.16)$$

Ο περιορισμός (2.3.15) καλύπτει την ισορροπία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ισχύος για κάθε χρονική περίοδο και ο αντίστοιχος (2.3.16) ορίζει τα όρια στρεφόμενης εφεδρείας

Η στρεφόμενη εφεδρεία σε κάθε περίοδο μπορεί να προσδιοριστεί από την μαθηματική σχέση:

$$SR_i(j) = p_i^{max}(j) - p_i(j) \quad (2.3.17)$$

Θερμικοί περιορισμοί

- **Όρια παραγωγής (Generation Limits)**

$$P_i^{min} v_i(j) \leq p_i(j) \leq p_i^{max}(j), \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.18)$$

$$0 \leq p_i^{max}(j) \leq P_i^{cap} v_i(j), \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.19)$$

Ο Περιορισμός (2.3.18) περιορίζει την παραγωγή ισχύος κάθε μονάδας για κάθε περίοδο εντός των ορίων ελάχιστης παραγόμενης ισχύος και μέγιστης διαθέσιμης παραγόμενης ισχύος η οποία είναι πάντα θετική και ορισμένη από τον Περιορισμό (2.3.19). Αξίζει να σημειωθεί πως σε περίπτωση που μια μονάδα είναι εκτός λειτουργίας, ισχύει: $v_i(j) = 0$ οπότε τα $p_i(j)$ και $p_i^{max}(j)$ είναι μηδενικά.

- **Όρια κλίσης (Ramp Limits)**

$$p_i(j) \leq p_i(j-1) + RU_i v_i(j-1) + SU_i [v_i(j) - v_i(j-1)] + P_i^{cap} [1 - v_i(j-1)], \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.20)$$

$$p_i(j) \leq P_i^{cap} v_i(j+1) + SD_i [v_i(j) - v_i(j+1)], \quad \forall i \in I, \forall j = 1 \dots T-1 \quad (2.3.21)$$

$$p_i(j-1) - p_i(j) \leq RD_i v_i(j) + SD_i [v_i(j-1) - v_i(j)] + P_i^{cap} [1 - v_i(j-1)], \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.3.22)$$

Οι μεταβλητές ισχύος καθορίζονται από τα ramp-up, startup ramp rates (2.3.20) , από τα shutdown ramp rates (2.3.21), καθώς και τα ramp-down limits (2.3.22). Σε περίπτωση που είναι θεμιτό τα όρια κλίσης να επηρεάζουν την στρεφόμενη εφεδρεία είναι αρκετό να γίνεται αντικατάσταση στους Περιορισμούς (2.3.19), (2.3.20) της ισχύος $p_i(j)$ στο αριστερό μέρος των ανισώσεων με την μέγιστη δυνατή ισχύ $p_i^{\max}(j)$ και σε συνδυασμό με τον Περιορισμό (2.3.16) το ζητούμενο επιτυγχάνεται.

- **Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας**

$$\sum_{j=1}^{G_i} [1 - v_i(j)] = 0, \quad \forall i \in I \quad (2.3.23)$$

$$\sum_{n=j}^{j+UT_i-1} v_i(n) \geq UT_i[v_i(j) - v_i(j-1)],$$

$$\forall i \in I, \quad \forall j = G_i + 1 \dots T - UT_i + 1 \quad (2.3.24)$$

$$\sum_{n=j}^T \{v_i(n) - [v_i(j) - v_i(j-1)]\} \geq 0,$$

$$\forall i \in I, \quad \forall j = T - UT_i + 2 \dots T \quad (2.3.25)$$

Ο Περιορισμός (2.3.23) σχετίζεται με την αρχική κατάσταση των μονάδων (initial status) και καθορίζεται από τον όρο G_i , δηλαδή τον αριθμό των αρχικών περιόδων (initial periods) κατά τις οποίες η μονάδα πρέπει να βρίσκεται σε λειτουργία.

Μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$G_i = \text{Min}\{T, [UT_i - U_i^0]V_i(0)\} \quad (2.3.26)$$

Ο Περιορισμός (2.3.24) χρησιμοποιείται για τις ακόλουθες περιόδους με σκοπό την ικανοποίηση του ελάχιστου χρόνου λειτουργίας κατά την διάρκεια όλων των πιθανών συνδυασμών διαδοχικών περιόδων πλήθους UT_i . Αντίστοιχα η Σχέση (2.3.25) αναγκάζει κάθε μονάδα σε περίπτωση εκκίνησης να παραμείνει σε λειτουργία για τις επόμενες $(UT_i - 1)$ περιόδους.

- **Ελάχιστος χρόνος κράτησης**

Αντίστοιχα ο ελάχιστος χρόνος κράτησης παρουσιάζεται με τις παρακάτω σχέσεις.

$$\sum_{j=1}^{L_i} [v_i(j)] = 0, \quad \forall i \in I \quad (2.3.27)$$

$$\sum_{n=j}^{j+DT_i-1} [1 - v_i(n)] \geq DT_i[v_i(j-1) - v_i(j)],$$

$$\forall i \in I, \quad \forall j = L_i + 1 \dots T - DT_i + 1 \quad (2.3.28)$$

$$\sum_{n=j}^T \{1 - v_i(n) - [v_i(j-1) - v_i(j)]\} \geq 0,$$

$$\forall i \in I, \quad \forall j = T - DT_i + 2 \dots T \quad (2.3.29)$$

Με L_i συμβολίζεται ο αριθμός των αρχικών περιόδων κατά τις οποίες η μονάδα πρέπει να βρίσκεται εκτός λειτουργίας και μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$L_i = \text{Min}\{T, [DT_i - S_i^0][1 - V_i(0)]\} \quad (2.3.30)$$

Παρατηρείται άμεση σχέση των περιορισμών ελάχιστου χρόνου και κράτησης καθώς με αντικατάσταση στους τελευταίους των μεγεθών $v_i(j)$, DT_i , S_i^0 με $1-v_i(j)$, UT_i , U_i^0 έχουμε την πρώτη έκφραση.

2.4 Μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω MILP

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ακολουθεί το μοντέλο του Κεφαλαίου 2.3, με ουσιαστική διαφοροποίηση την κάλυψη μέρους της ζήτησης φορτίου από τις ανανεώσιμες πηγές. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των ΑΠΕ είναι το ότι η ενέργεια η οποία παράγουν χρησιμοποιείται άμεσα στο σύστημα και οι συμβατικές μονάδες καλούνται να καλύψουν το απομένον φορτίο. Το μοντέλο που ακολουθεί η συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιεί μια ημιτονική συνάρτηση για την έκφραση της ισχύος που καλύπτουν οι ΑΠΕ σε αντίθεση με την συνηθισμένη στοχαστική προσέγγιση σεναρίων που προκύπτουν από μετρήσεις στην ζητούμενη περιοχή.

Η μελέτη εντάσσεται στην περίπτωση χαμηλού υπολειπόμενου φορτίου (low residual load case) που καλούνται να παράξουν οι συμβατικές μονάδες για υψηλή διείσδυση. Υπολογιστικά οι περιπτώσεις χαμηλής υπολειπόμενης ζήτησης παρουσιάζουν δυσκολία αντιμετώπισης στα μοντέλα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) οπότε συνήθως εφαρμόζονται και για μικρό αριθμό μονάδων παραγωγής.

Σύμφωνα με την εργασία του E. Delarue και των συνεργατών του (Delarue, et al. 2013) αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την διείσδυση των ΑΠΕ με την μορφή μιας μαθηματικά καθορισμένης συνάρτησης που εκφράζει την υπολειπόμενη ζήτηση που καλούνται να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μεγέθη που εντάσσονται στην έκφραση της ζήτησης.

Πίνακας 2-3: Μεταβλητές μαθηματικού μοντέλου με διείσδυση ΑΠΕ

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
\underline{D}	Ελάχιστη τιμή της ζήτησης $D(j)$	(MW)
FD	Συντελεστής βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ	-
n_j	Συνολικός αριθμός περιόδων	-
$LD(j)$	Χαμηλή υπολειπόμενη ζήτηση (Low residual demand)	(MW)

Η σχέση που ορίζει την υπολειπόμενη ζήτηση είναι η παρακάτω.

$$LD_j = D_j - FD \cdot \underline{D} \cdot \sin\left(\frac{(j-1) \cdot \pi}{nj-1}\right) \quad \forall j \in J \quad (2.4.1)$$

Ουσιαστικά για κάθε χρονική περίοδο αφαιρείται από την συνολική ζήτηση ο ημιτονικός όρος που εκφράζει την ζήτηση που καλύπτουν οι ΑΠΕ. Ο παράγοντας FD λειτουργεί ως συντελεστής βαρύτητας της διείσδυσης με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται να αυξάνεται και η διείσδυση των ΑΠΕ. Για μηδενική τιμή του το πλήρες φορτίο καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες και όσο αυξάνεται καταλήγουμε σε περίπτωση χαμηλής υπολειπόμενης ζήτησης (Low residual case). Ο γενικός ημιτονικός όρος, προκύπτει μηδενικός στην αρχή και το τέλος του χρονικού διαστήματος των περιόδων και αποκτά την μέγιστη τιμή του για την μέση περίοδο.

Επομένως καλούμαστε να υπολογίσουμε μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης 2 επιμέρους όρους κόστους, όπου ο πρώτος αναφέρεται στο συνολικό κόστος συμβατικών μονάδων και ο δεύτερος στο αντίστοιχο από τις ΑΠΕ. Στην συγκεκριμένη μελέτη θεωρούμε πως το κόστος παραγωγής αλλά και εκκίνησης των ΑΠΕ ανέρχεται σε μηδενικό επίπεδο.

3. Υπολογιστικό μοντέλο

3.1 Εισαγωγή

Για την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω της Problem – Based προσέγγισης Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP), η οποία χρησιμοποιεί συμβολικές εκφράσεις για τους περιορισμούς και τις μεταβλητές και αποτελεί ένα ιδιαίτερα φιλικό τρόπο γραφής για τον χρήστη. Η επίλυση γίνεται με την συνάρτηση `intlinprog` που αποτελεί έναν ενσωματωμένο επιλύτη (solver) της MATLAB για προβλήματα MILP. Δημιουργήθηκαν δύο αρχεία όπου το πρώτο περιλαμβάνει τα δεδομένα του μοντέλου το οποίο στην συνέχεια καλείται από το δεύτερο αρχείο και πραγματοποιείται η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Ο χρονικός ορίζοντας για τον οποίο υπολογίζεται το πρόγραμμα παραγωγής, ορίζεται από 24 ωριαίες περιόδου και ο αριθμός μονάδων καθορίζεται στην αρχή του κάθε μοντέλου προσαρμόζοντας και την αντίστοιχη πρόβλεψη ζήτησης ισχύος από το δίκτυο. Τα δεδομένα που εκφράζουν τα χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής αλλά και της ζήτησης είναι βασισμένα σε ένα σύστημα 10 μονάδων (αναλύεται στην Ενότητα 3.3.1) το οποίο σε περίπτωση επίλυσης μεγαλύτερου συστήματος πολλαπλασιάζονται ανάλογα.

3.2 Επίλυση μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με την χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος MATLAB

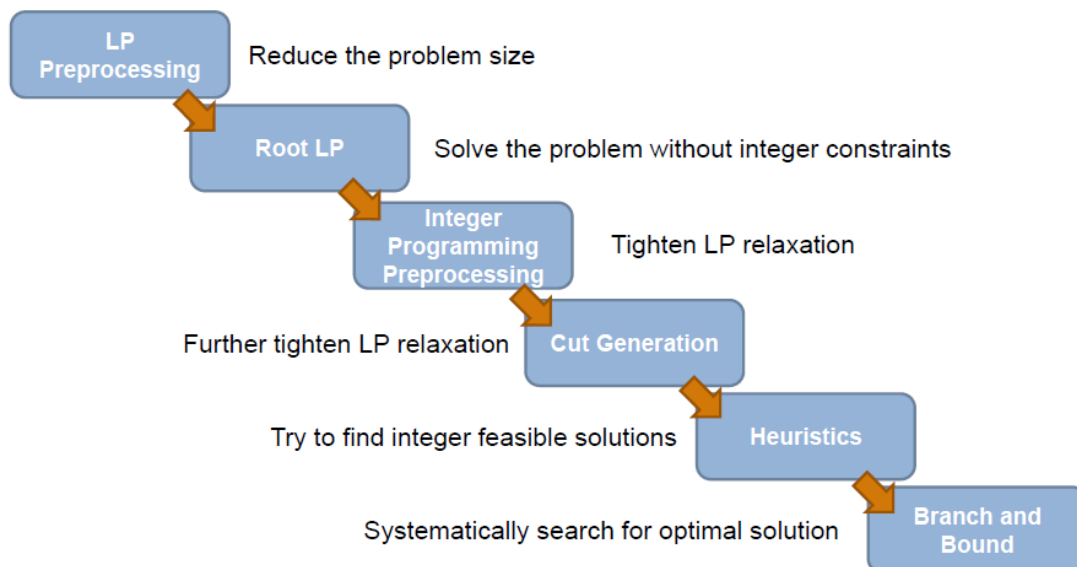
Η MATLAB (Matrix Laboratory) αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς και ένα αριθμητικό υπολογιστικό περιβάλλον το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρία Mathworks. Αποτελεί μια ιδιαίτερα φιλική επιλογή προς τον χρήστη αλληλεπιδρώντας με διάφορα άλλα υπολογιστικά πακέτα (πχ. CPLEX) και έχοντας ενσωματωμένους επιλύτες (solvers) για διάφορα προβλήματα με εφαρμογές στους κλάδους της μηχανικής, της επιστήμης και των οικονομικών.

Για την επίλυση προβλημάτων μεικτού ακέραιου προγραμματισμού η MATLAB διαθέτει έναν ενσωματωμένο αλγόριθμο που καλείται με την εντολή `intlinprog`. Η `intlinprog` χρησιμοποιεί την παρακάτω βασική στρατηγική, ακολουθώντας ιεραρχικά στάδια. Σε περίπτωση που το πρόβλημα επιλυθεί σε κάποιο από αυτά δεν εκτελούνται τα μεταγενέστερα. (Mathworks 2018)

- Μείωση του μεγέθους του προβλήματος χρησιμοποιώντας την μέθοδο Προεπεξεργασίας Γραμμικού Προγράμματος (Linear Program Preprocessing).
- Επίλυση αρχικού, μη ακεραίου προβλήματος που έχει υποστεί χαλάρωση (relaxation) με την μέθοδο του Γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming).

- Εκτέλεση Προεπεξεργασίας Μεικτού Ακέραιου Προγράμματος (Mixed-Integer Program Preprocessing) για την αυστηροποίηση της γραμμικής χαλάρωσης του μεικτού ακέραιου προβλήματος.
- Δοκιμή Cut Generation για την επιπλέον αυστηροποίηση της γραμμικής χαλάρωσης του μεικτού ακέραιου προβλήματος.
- Δοκιμή εύρεσης ακεραίων – εφικτών λύσεων με την χρήση ευρετικών μεθόδων (Heuristics).
- Χρήση του αλγορίθμου Branch and Bound για συστηματική αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιλύει τις γραμμικές χαλαρώσεις (LP relaxations) με περιορισμένο εύρος πιθανών τιμών για τις ακέραιες μεταβλητές. Προσπαθεί να δημιουργήσει μια ακολουθία επικαιροποιημένων ορίων για την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

intlinprog algorithm



Σχήμα 3-1: Περιγραφή του αλγορίθμου intlinprog

(πηγή, Mixed-integer Linear Programming in MATLAB, Seth Deland, 2014 The MathWorks, Inc.)

Προεπεξεργασία Γραμμικού Προγράμματος (Linear Program Preprocessing)

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας γραμμικού προγράμματος μειώνεται ο αριθμός των μεταβλητών στο πρόβλημα και των γραμμικών περιορισμών. Η εκτέλεση των μειώσεων μπορεί να αποδειχθεί χρονοβόρα για τον επιλύτη, αλλά μειώνει το συνολικό χρόνο επίλυσης και μπορεί να καταστήσει μεγαλύτερης κλίμακας προβλήματα επιλύσιμα. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται μπορούν να κάνουν την λύση περισσότερο αριθμητικά σταθερή είτε να ανιχνεύσουν το κατά πόσο το πρόβλημα είναι ανέφικτο. Αποσκοπούν στην εξάλειψη περιττών μεταβλητών και περιορισμών, στη βελτίωση της διαδικασίας κλιμάκωσης (scaling) του μοντέλου και ελλείψεων του μητρώου των περιορισμών με την ύπαρξη πολλών μηδενικών τιμών

(sparsity), στην ενίσχυση των ορίων των μεταβλητών και στον εντοπισμό ανέφικτων σημείων του πρωτεύοντος (primal) και δυαδικής μορφής (dual) μοντέλου. (E. Andersen and K.Andersen, 1995), (Mészáros and Suhl, 2003)

Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming)

Το αρχικό πρόβλημα που έχει υποστεί χαλάρωση είναι καθαρά γραμμικό καθώς περιέχει την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς που περιέχει και το μεικτό ακέραιο γραμμικό πρόβλημα, με εξαίρεση τους περιορισμούς της ακεραιότητας. Η λύση του υπό χαλάρωση καθαρά γραμμικού προβλήματος λειτουργεί ως κάτω όριο στις πιθανές λύσεις του ΜΑΓΠ καθώς πρόκειται για πανομοιότυπο πρόβλημα με λιγότερους περιορισμούς. Κατά την διάρκεια της χρήσης του αλγορίθμου Branch and Bound το αρχικό υπό χαλάρωση γραμμικό πρόβλημα (ριζικός κόμβος LP) και τα αντίστοιχα παραγόμενα LP επιλύονται με χρήση τεχνικών γραμμικού προγραμματισμού.

Προεπεξεργασία Μεικτού Ακέραιου Προγράμματος (Mixed-Integer Program Preprocessing)

Σε αυτό το στάδιο ο αλγόριθμος αναλύει τις γραμμικές ανισώσεις παράλληλα με τους περιορισμούς ακεραιότητας για να διαπιστωθεί εάν: το πρόβλημα είναι μη εφικτό, ορισμένα όρια μπορούν να γίνουν πιο αυστηρά, ορισμένες ανισότητες είναι περιττές ώστε να αμεληθούν ή να αφαιρεθούν, ορισμένες ανισότητες μπορούν να ενισχυθούν, ορισμένες ακέραιες μεταβλητές να αναχθούν σε σταθερές.

Ο κύριος στόχος της προεπεξεργασίας μεικτού ακέραιου προγράμματος είναι η απλοποίηση των επακόλουθων υπολογισμών που γίνονται μέσω του Branch and Bound. Η διαδικασία περιέχει ταχεία προκαταρκτική εξέταση και αποκλεισμό των ανώφελων πιθανών λύσεων που σε διαφορετική περίπτωση θα αναλύονταν μέσω Branch and Bound. (Savelsbergh, et al. 1994)

Cut Generation (Cut plane methods)

Ο όρος Cuts αναφέρεται στους επιπλέον ανισοτικούς γραμμικούς περιορισμούς τους οποίους ο αλγόριθμος προσθέτει στο πρόβλημα. Οι συγκεκριμένες ανισότητες προσπαθούν να περιορίσουν την εφικτή περιοχή των LP χαλαρώσεων έτσι ώστε οι λύσεις να προσεγγίζουν ακέραιους αριθμούς. (Cornuéjols 2008)

Ευρετικές μέθοδοι για την εύρεση εφικτών λύσεων (Heuristics)

Για τον προσδιορισμό ανώτατου ορίου για την αντικειμενική συνάρτηση, ο αλγόριθμος Branch and Bound πρέπει να βρει εφικτά σημεία. Επικεντρώνεται σε λύσεις σε κάποια απλοποιημένη μορφή LP χαλάρωσης κατά την διάρκεια του Branch and Bound που είναι ακέραιες και εφικτές, προσφέροντας ένα βελτιωμένο ανώτατο όριο στο αρχικό ΜΑΓΠ. Υπάρχουν τεχνικές για την εύρεση εφικτών λύσεων γρηγορότερα είτε πριν είτε κατά την διάρκεια του Branch and Bound, όμως προς το παρόν το intlinprog τις χρησιμοποιεί μόνο στον ριζικό κόμβο (root node) και όχι στις ακόλουθες επαναλήψεις. Οι συγκεκριμένες τεχνικές είναι ευρετικές, με αποτέλεσμα να αποτελούν αλγορίθμους οι οποίοι δεν εγγυώνται την σίγουρη επίτευξη του ζητουμένου.

Branch and Bound

Η μέθοδος Branch and Bound δημιουργεί μια ακολουθία υποπροβλημάτων που προσπαθούν να συγκλίνουν σε μια λύση του ΜΑΓΠ. Τα υποπροβλήματα εξάγουν μια ακολουθία άνω και κάτω ορίων στο μητρώο των λύσεων. Για αρχικές τιμές στην περίπτωση του ανώτατου ορίου χρησιμοποιείται οποιαδήποτε εφικτή λύση και στο κατώτατο η λύση του καθαρά γραμμικού προβλήματος υπό χαλάρωση (relaxed problem). Όπως αναφέρθηκε και στο στάδιο του γραμμικού προγραμματισμού η λύση του υπό χαλάρωση προβλήματος έχει σίγουρα χαμηλότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με την λύση του ΜΑΓΠ. (Nemhauser and Wolsey, 1999) , (Wolsey 1998)

Σχετικό σφάλμα (Relative Gap)

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του ΜΑΓΠ είναι η παροχή μέτρου του σχετικού σφάλματος της λύσης που προκύπτει από την βελτιστοποίηση. Η συνάρτηση `intlinprog` παρέχει καθ' όλη την επίλυση ένδειξη αυτού, ως έναν πραγματικό αριθμό εκφρασμένο ως ποσοστό, ο οποίος μπορεί να οριστεί και σαν κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας. Εκφράζει την ποσοστιαία σχετική διαφορά των εσωτερικά υπολογισμένων ανώτατου (U) και κατώτατου (L) ορίων της αντικειμενικής συνάρτησης που υπολογίζεται μέσω της μεθόδου Branch and Bound.

Δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$relativegap = \frac{U - L}{|U| + 1} \cdot 100\% \quad (3.2.1)$$

Problem – Based προσέγγιση του επιλύτη (solver) της MATLAB

Στο υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς την σύνταξη του κώδικα για την μοντελοποίηση και εν συνεχεία επίλυση του προβλήματος, η Solver – Based και η Problem – Based.

- Η Solver – Based προσέγγιση του επιλύτη (solver) δέχεται ως εισόδους (inputs) την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς ως μητρώα με αποτέλεσμα να είναι σχετικά δύσχρηστη στην σύνταξη του κώδικα, δέχεται αρχεία τα οποία ακολουθούν την μορφή MPS (Mathematical Programming System) και επιλύει το πρόβλημα σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα.
- Η Problem – Based προσέγγιση είναι πιο φιλική στον χρήστη ως προς την μοντελοποίηση, δέχεται ως εισόδους (inputs) την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς σε συμβολική μορφή αρκετά κοντά στην μαθηματική τους έκφραση και επιλύει το πρόβλημα σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα επειδή εσωτερικά μετατρέπει το μοντέλο σε μορφή μητρώων.

Οι βασικές εκφράσεις μοντελοποίησης με Problem – Based προσέγγιση παραθέτονται παρακάτω (Problem-based Optimization, Mathworks 2018).

- **Δημιουργία μεταβλητών και προβλήματος**

Πίνακας 3-1: Εντολές ορισμού μεταβλητών και προβλήματος συνάρτησης intlinprog

optimproblem	Δημιουργία προβλήματος βελτιστοποίησης
optimvar	Δημιουργία μεταβλητών βελτιστοποίησης
showbounds	Εμφάνιση ορίων μεταβλητών
showproblem	Εμφάνιση προβλήματος βελτιστοποίησης
showvar	Εμφάνιση μεταβλητών βελτιστοποίησης
writebounds	Αποθήκευση περιγραφής ορίων μεταβλητών
writeproblem	Αποθήκευση περιγραφής του προβλήματος βελτιστοποίησης
writevar	Αποθήκευση περιγραφής μεταβλητών βελτιστοποίησης

- **Εκφράσεις και περιορισμοί**

Πίνακας 3-2: Εντολές ορισμού εκφράσεων και περιορισμών συνάρτησης intlinprog

optimconstr	Δημιουργία κενής σειράς περιορισμών βελτιστοποίησης
optimexpr	Δημιουργία κενής σειράς εκφράσεων βελτιστοποίησης
showconstr	Εμφάνιση περιορισμού βελτιστοποίησης
showexpr	Εμφάνιση έκφρασης βελτιστοποίησης
writeconstr	Αποθήκευση περιορισμού βελτιστοποίησης
writeexpr	Αποθήκευση έκφρασης βελτιστοποίησης

- **Επίλυση και ανάλυση**

Πίνακας 3-3: Εντολές επίλυσης και ανάλυσης δεδομένων συνάρτησης intlinprog

evaluate	Υπολογισμός αξίας της έκφρασης βελτιστοποίησης
findindex	Εύρεση ισοδύναμου αριθμητικού δείκτη
infeasibility	Παραβίαση περιορισμών σε κάποιο σημείο
prob2struct	Μετατροπή προβλήματος βελτιστοποίησης σε solver προσέγγιση
solve	Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης

- **Αντικείμενα (Objects)**

Πίνακας 3-4: Αντικείμενα συνάρτησης intlinprog

OptimizationConstraint	Περιορισμοί βελτιστοποίησης
OptimizationExpression	Αντικειμενική συνάρτηση ή περιορισμοί
OptimizationProblem	Πρόβλημα βελτιστοποίησης
OptimizationVariable	Μεταβλητή βελτιστοποίησης

3.3 Επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων χωρίς όρια κλίσης (Ramp Rates)

3.3.1 Δεδομένα πρότυπου συστήματος 10 μονάδων (Case Study)

Το πρότυπο σύστημα 10 μονάδων από το οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα του συστήματος παρουσιάστηκε από τον Σ. Καζαρή και τους συνεργάτες του (Kazarlis, et al. 1996) και αποτελεί ένα παγκοσμίως διαδεδομένο case study το οποίο χρησιμοποιείται ώστε να καθοριστεί πλήρως κατά πόσο ένα μοντέλο είναι λειτουργικό. Τα βασικά δεδομένα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 3-5: Δεδομένα μονάδων συστήματος I

Αριθμός μονάδας	P^{cap} [MW]	P^{min} [MW]	UT [h]	DT [h]	Inistate [h]
1	455	150	8	8	8
2	455	150	8	8	8
3	130	20	5	5	-5
4	130	20	5	5	-5
5	162	25	6	6	-6
6	80	20	3	3	-3
7	85	25	3	3	-3
8	55	10	1	1	-1
9	55	10	1	1	-1
10	55	10	1	1	-1

Πίνακας 3-6: Δεδομένα μονάδων συστήματος II

Αριθμός μονάδας	a [\$/h]	b [\$/MWh]	c [\$/MW ² h]	hc [\$/h]	cc [\$/h]	t ^{cold} [h]
1	1000	16,19	0,00048	4500	9000	5
2	970	17,26	0,00031	5000	10000	5
3	700	16,60	0,00200	550	1100	4
4	680	16,50	0,00211	560	1120	4
5	450	19,70	0,00398	900	1800	4
6	370	22,26	0,00712	170	340	2
7	480	27,74	0,00079	260	520	2
8	660	25,92	0,00413	30	60	0
9	665	27,27	0,00222	30	60	0
10	670	27,79	0,00173	30	60	0

Πίνακας 3-7: Προβλεπόμενη ζήτηση φορτίου

Ωρα [h]	1	2	3	4	5	6
Ζήτηση [MW]	700	750	850	950	1000	1100
Ωρα [h]	7	8	9	10	11	12
Ζήτηση [MW]	1150	1200	1300	1400	1450	1500
Ωρα [h]	13	14	15	16	17	18
Ζήτηση [MW]	1400	1300	1200	1050	1000	1100
Ωρα [h]	19	20	21	22	23	24
Ζήτηση [MW]	1200	1400	1300	1100	900	800

Γραμμικοποίηση συναρτήσεων κόστους παραγωγής και εκκίνησης

Για την γραμμικοποίηση της συνάρτησης του κόστους παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν διάφορα πλήθη διαστημάτων (segments) στην τμηματική γραμμική συνάρτηση προσέγγισης με αρχική τιμή τα 4 τμήματα και στην συνέχεια δοκιμές με 6, 8, 10, 12. Αντίστοιχα στην βηματική (stairwise) συνάρτηση κόστους εκκίνησης χρησιμοποιούνται 15 διαστήματα όπου το καθένα αντιστοιχεί σε ωριαίες περιόδους κατά τις οποίες η μονάδα βρισκόταν εκτός λειτουργίας. Τα 15 διαστήματα θεωρούνται αρκετά εφόσον η συνάρτηση αποδίδει δύο τιμές στο κόστος εκκίνησης (cold και hot start). Το μέγιστο πλήθος περιόδων για το οποίο επέρχεται μετάβαση από 'θερμή' σε 'ψυχρή' κατάσταση εκκίνησης προκύπτει πως είναι οι 14 ώρες εκτός λειτουργίας, οπότε ορίζοντας τιμή οριακά μεγαλύτερη από την παραπάνω μειώνεται το υπολογιστικό κόστος αναζήτησης της Σχέσης (2.3.10).

Όριο στρεφόμενης εφεδρείας

Για την διασφάλιση αξιοπιστίας του συστήματος ορίζεται όριο στρεφόμενης εφεδρείας για κάθε περίοδο, ίσο με το 10% της προβλεπόμενης ζήτησης φορτίου.

3.3.2 Επίλυση συστήματος 10 μονάδων

Η υπολογιστική έκφραση του συστήματος 10 μονάδων αποτελεί την βάση για όλες τις υπόλοιπες εκδοχές του προβλήματος καθώς και το μοντέλο το οποίο λόγω σχετικά μικρού υπολογιστικού μεγέθους προσφέρεται για δοκιμές κατά την σύνταξη του κώδικα. Για κάθε εκδοχή του αλγορίθμου δημιουργούνται δύο προγράμματα στην MATLAB R2018a, όπου:

- Το πρώτο διαθέτει τα δεδομένα που αντλούνται από το Case Study που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο (3.3.1).
- Το δεύτερο περιέχει την κύρια μοντελοποίηση του ΠΕΜ όπως και την επίλυση με χρήση της εσωτερικής συνάρτησης μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, `intlinprog`.

Πρόγραμμα 1

Στο πρόγραμμα 1 υπάρχουν κυρίως τα δεδομένα όπως και οι απαραίτητες πράξεις για τον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών που προκύπτουν από το Case Study που ζητούμαστε να επιλύσουμε. Για διευκόλυνση του χρήστη, υπάρχει παραμετροποίηση ως προς τα παρακάτω μεγέθη με σκοπό την ενιαία χρήση του ίδιου αλγορίθμου για διάφορες αλλαγές κυρίως στον αριθμό των μονάδων ή στον αριθμό των τμημάτων (segments) της τμηματικής συνάρτησης κόστους παραγωγής.

- **nUnits:** Αριθμός μονάδων παραγωγής
- **nHours:** Αριθμός περιόδων
- **nNL:** Αριθμός τμημάτων (segments) τμηματικής συνάρτησης κόστους παραγωγής
- **nND:** Αριθμός διαστημάτων της stairwise συνάρτησης κόστους εκκίνησης

Τα δεδομένα που προκύπτουν από το `dedomena.m` αποθηκεύονται σε ένα βοηθητικό αρχείο με όνομα `dedom10.mat` το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιείται από το Πρόγραμμα 2 `MILP1_10units.m` χάριν διευκόλυνσης και ομαδοποίησης των συγκεκριμένων διεργασιών.

Πρόγραμμα 2

Για την μοντελοποίηση του προβλήματος ακολουθείται η ενδεδειγμένη γραφή της Problem – Based προσέγγισης της συνάρτησης `intlinprog`. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο να προσαρμοστούν οι εκφράσεις και οι περιορισμοί ώστε να μπορούν να αποτελέσουν την είσοδο της εσωτερικής συνάρτησης. Όπως παρατηρείται, η γραφή με την συγκεκριμένη μέθοδο είναι ιδιαίτερα φιλική προς τον χρήστη λόγω της δυνατότητας συμβολικής γραφής του μαθηματικού μοντέλου.

Ορισμός προβλήματος βελτιστοποίησης

Για τον ορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης όπως φαίνεται και στον Πίνακα (3-1) χρησιμοποιείται η εντολή:

$$MILP_UC = optimprob \quad (3.3.1)$$

Με αυτόν τον τρόπο ονομάζουμε το πρόβλημα MILP_UC και κάθε έκφραση που σχετίζεται με αυτό θα φέρει και την παραπάνω ονομασία.

Ορισμός μεταβλητών βελτιστοποίησης

Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος, δηλαδή τις άγνωστες ποσότητες που προσδιορίζουν το πρόβλημα και αποτελούν την λύση του. Για τον συγκεκριμένο αλγόριθμο οι μεταβλητές βελτιστοποίησης ορίζονται οι παρακάτω:

- **v**: ακέραια μεταβλητή κατάστασης που ορίζει την λειτουργία κάθε μονάδας σε κάθε περίοδο.
- **delta**: πραγματική μεταβλητή που ορίζει την παραγόμενη ισχύ σε κάθε διάστημα της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής κάθε μονάδας σε κάθε περίοδο.
- **c_u**: πραγματική μεταβλητή που ορίζει το κόστος εκκίνησης (startup cost) κάθε μονάδας σε κάθε περίοδο.

Η ένταξη στον αλγόριθμο επιτυγχάνεται μέσω των Εντολών (3.3.2). Ταυτόχρονα δηλώνεται ο τύπος της μεταβλητής (integer σε περίπτωση ακεραίας), οι διαστάσεις του πίνακα αποθήκευσης καθώς και το ανώτατο ή κατώτατο όριο.

Για την *v* εφόσον θέλουμε να είναι δυαδική μπορεί μέσω των ορίων να παίρνει μόνο τις τιμές (0,1). Στην περίπτωση της *delta* ορίζεται ως πραγματική, που είναι η default επιλογή, με κατώτατο όριο 0 και ανώτατο *deltamax* που αποτελεί τη διαφορά των επιμέρους σημείων ισχύος που ορίζουν το αντίστοιχο διάστημα της τμηματικής συνάρτησης. Τέλος, η μεταβλητή *c_u* ορίζεται ως πραγματική με κατώτατο όριο 0 και ανώτατο ίσο με το κόστος 'ψυχρής' εκκίνησης (cold start).

```
v = optimvar('v',nUnits,nHours,'Type','integer','LowerBound',0,'UpperBound',1)
delta = optimvar('delta',nUnits,nHours,nNL,'LowerBound',0,'UpperBound',deltamax)
c_u = optimvar('c_u',nUnits,nHours,'LowerBound',0,'UpperBound',cu_max) \quad (3.3.2)
```

Κόστος Παραγωγής (Production Cost)

Το κόστος παραγωγής εκφράζεται μέσω της γραμμικής Σχέσης (2.3.3) και (2.3.4). Εντάσσεται στις εκφράσεις βελτιστοποίησης (Optimization expressions) και όχι στις μεταβλητές καθώς προκύπτει από ισότητα που περιέχει τις υπόλοιπες μεταβλητές βελτιστοποίησης. Δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$c_p = Acp.*v + sum(F.*delta,3) \quad (3.3.3)$$

Η σταθερά A_{cp} προκύπτει από την Σχέση (2.3.4) ενώ ο όρος του αθροίσματος προσθέτει το γινόμενο των κλίσεων F των τμημάτων της γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής με την αντίστοιχη παραγόμενη ισχύ Δ .

Για την εύρεση των κλίσεων F κάνουμε χρήση της τετραγωνικής έκφρασης του κόστους παραγωγής (2.3.2) και βρίσκουμε κάποια επιμέρους σημεία πάνω στην καμπύλη ανάλογα με τον αριθμό n_{NL} των τμημάτων (segments) της γραμμικής προσέγγισης που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Στην περίπτωση των τεσσάρων τμημάτων χρησιμοποιούμε την κατώτατη δυνατή ισχύ P_{min} και την χωρητικότητα κάθε μονάδας P_{cap} και βρίσκουμε τρία ισοκατανεμημένα σημεία ισχύος ανάμεσα στο διάστημα (P_{min}, P_{cap}) . Χρησιμοποιώντας τα 5 σημεία βρίσκουμε τα αντίστοιχα κόστη c_p και καταλήγουμε στις παρακάτω κλίσεις.

$$F_{l,i} = \frac{c_{l+1,i}^p - c_{l,i}^p}{T_{l+1,i} - T_{l,i}} \quad (3.3.4)$$

Κόστος εκκίνησης (Startup Cost)

Ο προσδιορισμός του χρονικά εξαρτώμενου κόστους εκκίνησης επιτυγχάνεται με την χρήση της Σχέσης (2.3.10) μέσω διάφορων ανισοτικών σχέσεων που εισάγονται στον αλγόριθμο με την μορφή περιορισμών.

Αρχικά λαμβάνουμε υπόψη τα initial states τα οποία υπάρχουν στον Πίνακα (3-5). Για να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν από την ανισοτική Σχέση (2.3.10) δημιουργούμε έναν πίνακα διαστάσεων $(n_{Units}, 8)$, λόγω του ότι 8 είναι ο μέγιστος αριθμός της στήλης $inistate$, ο οποίο απεικονίζει με $(0,1)$ την κατάσταση λειτουργίας πριν από την πρώτη περίοδο του συστήματος. Αν για παράδειγμα μια μονάδα είναι για 5 περιόδους κλειστή, θεωρούμε ότι πριν είναι σε κατάσταση λειτουργίας άρα απεικονίζεται ως 1 και τις πέντε τελευταίες έχει ένδειξη 0. Ο πίνακας με τα initial states παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 3-8: Initial states των μονάδων παραγωγής

Μονάδες	Περίοδοι							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	0	0	0	0
4	1	1	1	0	0	0	0	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0
6	1	1	1	1	1	0	0	0
7	1	1	1	1	1	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	1	0
9	1	1	1	1	1	1	1	0
10	1	1	1	1	1	1	1	0

Για την ενσωμάτωση των εν λόγω περιορισμών ορίζουμε αρχικά έναν κενό πίνακα περιορισμών με διαστάσεις [nUnits,nHours,nND] και στην συνέχεια δημιουργούμε μια επαναληπτική διαδικασία για κάθε μονάδα παραγωγής με προς τα πίσω αναζήτηση στον πίνακα κατάσταση λειτουργίας των μονάδων. Για κάθε κόστος εκκίνησης c_u ουσιαστικά υπάρχουν nND ανισώσεις όπου λόγω της φύσης του προβλήματος ελαχιστοποίησης η ανισότητα με την μεγαλύτερη τιμή (είτε hot start είτε cold start) ορίζει το κατώτατο όριο και εν τέλει την τιμή που παίρνει το κόστος. Σε περίπτωση που λόγω της διαφοράς των μεταβλητών κατάσταση λειτουργίας (v) το κατώτατο όριο προκύπτει αρνητικό τότε υπερισχύει η κατώτατη τιμή που έχει χρησιμοποιηθεί στον ορισμό του c_u ως μεταβλητή βελτιστοποίησης (κατώτατη τιμή 0) δηλαδή το 0 καλύπτοντας τον περιορισμό μη αρνητικότητας.

Διαδικασία υπολογισμού κόστους εκκίνησης σε ψευδογλώσσα

Για κάθε μονάδα i

Για κάθε περίοδο j

Για κάθε t από 1 έως (όρια πίνακα με μέγιστη τιμή 15 με έλεγχο και στον πίνακα των initial states)

Υπολόγισε τον περιορισμό MILP_UC.Constraints.cu

Τέλος κάθε t

Τέλος κάθε j

Τέλος κάθε i

Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ορίζεται σύμφωνα με την Σχέση (2.3.1) και την εισάγουμε στο πρόβλημα μέσω της εντολής:

$$MILP_UC.Objective = sum(sum(c_p + c_u)) \quad (3.3.5)$$

Περιορισμοί

Οι περιορισμοί μοντελοποιούνται αντίστοιχα με δημιουργία πινάκων που ενσωματώνουν κάθε θεματική ομάδα, με δυνατότητα χρήσης είτε εξίσωσης είτε ανισοτικής έκφρασης. Με την Problem Based προσέγγιση της Matlab για την συνάρτηση intlinprog είναι δυνατή η πινακοποίηση των περιορισμών που μπορούν να εκφράζονται μέσω ισοτήτων ή ανισοτήτων στις οποίες μπορούν να περιέχονται οι μεταβλητές ή οι εκφράσεις βελτιστοποίησης όπως και διάφορα δεδομένα.

Συμβολίζονται με την ονομασία MILP_UC.Constraints.(ονομασία) όπου στην (ονομασία) αντικαθίσταται το όνομα του κάθε πίνακα περιορισμών. Για την ένταξη

τους στο μοντέλο χρησιμοποιούνται οι εκφράσεις που περιγράφονται από τις Σχέσεις (2.3.15) - (2.3.19) και (2.3.23)-(2.3.30) .

Κλήση της συνάρτησης `intlinprog` για λύση του προβλήματος

Αφού έχουμε ολοκληρώσει την μοντελοποίηση του προβλήματος καλούμε την συνάρτηση `intlinprog` με χρήση της παρακάτω εντολής.

$$[sol, TotalCost, exitflag, output] = solve(MILP_UC, options) \quad (3.3.6)$$

Όπου:

- **sol**: Πίνακας με την τελική λύση του προβλήματος, περιέχει 3 διαφορετικές μεταβλητές (`sol.v`, `sol.c_u`, `sol.delta`) με διαστάσεις `[nUnits,nHours]` για τα 2 πρώτα και `[nUnits,nHours,nNL]` για το τελευταίο
- **TotalCost**: Τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που ορίζει το γραμμικό συνολικό κόστος
- **exitflag**: Κατάσταση τερματισμού του αλγορίθμου
- **output**: Περίληψη διαδικασίας επίλυσης, αποτελεί δομή που περιέχει πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία επίλυσης

Πίνακας 3-9: Έξοδοι της μεταβλητής `exitflag`

2	Η <code>intlingprog</code> τερματίστηκε πρόωρα. Βρέθηκε ακέραια εφικτή λύση
1	Η <code>intlinprog</code> συνέκλινε στην λύση <code>x</code>
0	Η <code>intlingprog</code> τερματίστηκε πρόωρα. Δεν βρέθηκε ακέραια εφικτή λύση
-1	Η <code>intlinprog</code> τερματίστηκε από μια συνάρτηση εξόδου ή μια γραφική συνάρτηση
-2	Δεν βρέθηκε εφικτό σημείο
-3	Το βασικό LP πρόβλημα δεν διαθέτει όρια

Για τον καθορισμό των `options` (επιλογών) χρησιμοποιούμε την παρακάτω εντολή:

$$options = optimoptions('intlinprog','MaxTime',300, \\ 'Heuristics','advanced','CutGeneration','advanced') \quad (3.3.7)$$

- **intlingprog**: Προσδιορισμός αλγορίθμου βελτιστοποίησης
- **Maxtime**: Μέγιστος χρόνος τρεξίματος του αλγορίθμου
- **Heuristics**: Αλγόριθμος αναζήτησης εφικτών λύσεων
- **CutGeneration**: Επίπεδο του αλγορίθμου Cut generation

Η αλλαγή των `Heuristics` και `CutGeneration` από 'basic' σε 'advanced' παρατηρήθηκε μετά από δοκιμές πως βελτιώνουν την σύγκλιση ειδικά σε συστήματα με

περισσότερες μονάδες. Στην περίπτωση των 10 μονάδων το αποτέλεσμα δεν αλλάζει.

Υπολογισμός παραγόμενης ισχύος

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος χρησιμοποιούμε την γραμμική σχέση (2.3.5) η οποία προσθέτει την ισχύ κάθε μέρους της τμηματικής συνάρτησης και τα προσθέτει με την ελάχιστη δυνατή ισχύ εφόσον η μονάδα είναι σε κατάσταση λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί πως χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα αφού έχει τρέξει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης.

$$power = sum(sol.\delta, 3) + Pmin .* sol.v \quad (3.3.8)$$

Υπολογισμός συνολικού κόστους μέσω της τετραγωνικής έκφρασης

Έχοντας επιλύσει το πρόβλημα ένταξης μονάδων διαθέτουμε λύση συνολικού κόστους που προκύπτει από την μεταβλητή TotalCost και είναι η τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατά την μοντελοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση της τετραγωνικής συνάρτησης μέσω γραμμικών τμημάτων (Σχέση 2.3.3) οπότε υπάρχει σίγουρα μια μικρή απόκλιση που βέβαια μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την αύξηση των τμημάτων (segments). Ωστόσο, η βέλτιστη λύση για έναν καθορισμένο προγραμματισμό των μονάδων μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας την παραγόμενη ισχύ από την Σχέση (3.3.8) ως είσοδο στην τετραγωνική έκφραση του κόστους παραγωγής της Σχέσης (2.3.2). Στην συνέχεια, προστίθεται στο συνολικό κόστος εκκίνησης και προκύπτει το συνολικό κόστος το οποίο είναι ανεξάρτητο από τα τμήματα γραμμικοποίησης.

3.3.3 Επίλυση συστήματος 20 και 40 μονάδων

Για την επίλυση συστημάτων με μεγαλύτερο αριθμό μονάδων ουσιαστικά κάνουμε χρήση του βασικού μοντέλου του Κεφαλαίου 3.3.2 θέτοντας κατάλληλο αριθμό για τα μεγέθη nUnits, nHours και αντίστοιχα αναπαράγοντας τα βασικά δεδομένα ανάλογα με το ζητούμενο σύστημα. Για χάρη παραμετροποίησης ορίζουμε το μέγεθος DM (Dimension Multiplier) και στην συνέχεια δημιουργούμε τους νέους πίνακες με τις Σχέσεις (3.3.10) και (3.3.11) ανάλογα τις διαστάσεις του πίνακα.

$$DM = \frac{nUnits}{10} \quad (3.3.9)$$

$$New_matrix = repelem(old_matrix, DM) \quad (3.3.10)$$

$$New_matrix = repelem(old_matrix, DM, 1) \quad (3.3.11)$$

Για την δεδομένη ζήτηση φορτίου πολλαπλασιάζουμε αυτή των 10 μονάδων με την ποσότητα DM και αντίστοιχα προκύπτει μέσω της νέας ζήτησης η νέα τιμή του ορίου της στρεφόμενης εφεδρείας. Για την αποθήκευση των δεδομένων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα αντίστοιχα Προγράμματα 2, δημιουργούνται τα

βοηθητικά αρχεία dedomena20.m και dedomena40.m για τα συστήματα 20 και 40 μονάδων αντίστοιχα.

Ένταξη αρχικής λύσης

Το μοντέλο των 40 μονάδων παρουσίασε δυσκολία σύγκλισης λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών οπότε για να επιτευχθεί μια αποδεκτή λύση, χρησιμοποιήθηκε μια πρότυπη αρχική λύση η οποία προέκυψε μέσω της λύσης από το μοντέλο των 10 μονάδων. Με την γνωστή διαδικασία των Σχέσεων (3.3.5) και (3.3.6) τα δεδομένα προσαρμόστηκαν στις διαστάσεις του νέου αλγορίθμου και εντάχθηκαν με παραλλαγή της εντολής options (Σχέση 3.3.7).

$$[sol, TotalCost, exitflag, output] = solve(MILP_UC, x0, 'options', options) \quad (3.3.12)$$

3.4 Επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με χρήση ορίων κλίσης (Ramp Rates)

3.4.1 Υπολογιστική προσαρμογή των ορίων κλίσης (Ramp Rates)

Το μοντέλο με όρια κλίσης (Ramp Rates) χρησιμοποιεί το βασικό μοντέλο του Κεφαλαίου 3.2 εντάσσοντας ένα ακόμα στοιχείο που το καθιστά πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες. Ουσιαστικά τα όρια κλίσης αποτελούν πολύ σημαντικό κομμάτι του προβλήματος ένταξης μονάδων αυξάνοντας το συνολικό κόστος παραγωγής αλλά και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο. Για την ένταξή τους, χρησιμοποιούνται οι Περιορισμοί (2.3.20), (2.3.21) και (2.3.22) στο πρόγραμμα 2 με ονομασίες MILP_UC.Constraints.Rampup, MILP_UC.Constraints.SDownramp και MILP_UC.Constraints.Rampdown αντίστοιχα. Μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, λόγω της χρήσης πίσω και εμπρός διαφορών για την ισχύ p και για την μεταβλητή κατάστασης v , οι εν λόγω περιορισμοί μοντελοποιούνται κατάλληλα για κάθε μονάδα παραγωγής και περίοδο.

Αξίζει να σημειωθεί πως για την πρώτη περίοδο δεν λαμβάνονται υπόψη οι παραπάνω περιορισμοί διότι δεν γνωρίζουμε το επίπεδο ισχύος κατά τις initial περιόδους ούτε και την αντίστοιχη ζήτηση του δικτύου.

3.4.2 Εφαρμογή στα συστήματα 10 και 20 μονάδων

Με την χρήση των παραπάνω περιορισμών που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο (3.4.1) είναι εύκολο στα ήδη υπάρχοντα μοντέλα 10 και 20 μονάδων (διαφορά στο πρόγραμμα 1 η αλλαγή της παραμέτρου $nUnits$) να καταλήξουμε στον ζητούμενο αλγόριθμο. Για την εν λόγω εφαρμογή, ακολουθώντας πιστά τους Περιορισμούς (2.3.20) – (2.3.22) τα όρια κλίσης δεν επηρεάζουν την στρεφόμενη εφεδρεία. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο σύστημα 10 μονάδων εντάσσονται στο πρόγραμμα 1 dedomena10_ramp.m από το οποίο εξάγεται το βοηθητικό

dedom10_ramp.mat και εισάγεται στο πρόγραμμα 2 MILP1_10units_ramp. Αντίστοιχα για το μοντέλο 20 μονάδων χρησιμοποιούνται τα αρχεία dedomena20_ramp.m , dedom20_ramp.mat και MILP1_20units_ramp αντίστοιχα. Τα δεδομένα των ορίων κλίσεων απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3-10: Δεδομένα ορίων κλίσης των μονάδων παραγωγής

SD_i	P_i^{cap}
SU_i	P_i^{cap}
RD_i	$20\% P_i^{cap}$
RU_i	$20\% P_i^{cap}$

Ουσιαστικά έχουν χρησιμοποιηθεί τιμές οι οποίες είναι διαδεδομένες στη διεθνή βιβλιογραφία με σκοπό την δυνατότητα σύγκρισης σε μη ανταγωνιστικό επίπεδο. Τα όρια κλίσης εκκίνησης και τερματισμού έχουν ληφθεί ίσα με την χωρητικότητα κάθε μονάδας ώστε σε περίπτωση που μια μονάδα είτε επέρχεται σε κατάσταση λειτουργίας είτε αποσυνδέεται από το δίκτυο να μην επηρεάζεται από τα όρια κλίσης. Τα αντίστοιχα όρια, για κάθε μονάδα που είναι σε κατάσταση λειτουργίας ισούται με την τυπική τιμή του 20% της χωρητικότητας της.

3.5 Επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν μέρος της ζήτησης φορτίου περιοριζόμενες από καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Το υπόλοιπο ενέργειας καλούνται να το προσφέρουν οι συμβατικές μονάδες διατηρώντας την αξιοπιστία και την ομαλότητα του συστήματος. Χρησιμοποιώντας την ντετερμινιστική έκφραση που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο (2.4) λαμβάνουμε μέσω της ημιτονοειδούς έκφρασης παραγωγής των ΑΠΕ, την υπολειπόμενη ζήτηση που καλείται το πρόβλημα ένταξης μονάδων να αντιμετωπίσει. Ο συντελεστής βαρύτητας διείσδυσης FD, αποτελεί το μέτρο διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα και για διάφορες τιμές του $[0,5 / 1 / 1,5]$ έχουμε και ανάλογη μεταβολή στην τιμή της ζήτησης.

Στον αλγόριθμο επίλυσης για 10 μονάδες παραγωγής προκειμένου να εντάξουμε τις ΑΠΕ αρκεί να δημιουργηθεί ένας νέος πίνακας ζήτησης ο οποίος έχει μεταβληθεί σύμφωνα με την Σχέση (2.4.1). Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται από το πρόγραμμα MILP1_10units_LD.m με δεδομένη την τιμή FD για κάθε περίοδο. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται σύγκριση του συνολικού κόστους παραγωγής στην περίπτωση ένταξης μονάδων και σε αυτή καθαρά συμβατικής παραγωγής.

4. Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για την ζήτηση αλλά και τα χαρακτηριστικά των μονάδων που εμφανίζονται στο Κεφάλαιο 3 (Πίνακες 3-6 έως 3-8) παρουσιάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια τα οποία εξετάζουμε για το πρόβλημα ένταξης μονάδων (Unit Commitment Problem). Αρχικά μοντελοποιείται το σύστημα με χρονικά μεταβλητό κόστος εκκίνησης των μονάδων χωρίς την ενσωμάτωση ορίων κλίσης (ramp rates) για διάφορα πλήθη μονάδων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μελέτη της επίδρασης του αριθμού των τμημάτων που χρησιμοποιούνται για την γραμμικοποίηση της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους παραγωγής, στην τελική λύση του προβλήματος. Στο τρίτο σενάριο εντάσσονται στο μοντέλο όρια κλίσης (ramp rates). Τέλος, αξιολογείται η μεταβολή του τελικού κόστους παραγωγής, που επιβάλλεται λόγω της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μίγμα παραγωγής σε σχέση με τη χρήση καθαρά συμβατικών (θερμικών) μονάδων για την κάλυψη της ζήτησης.

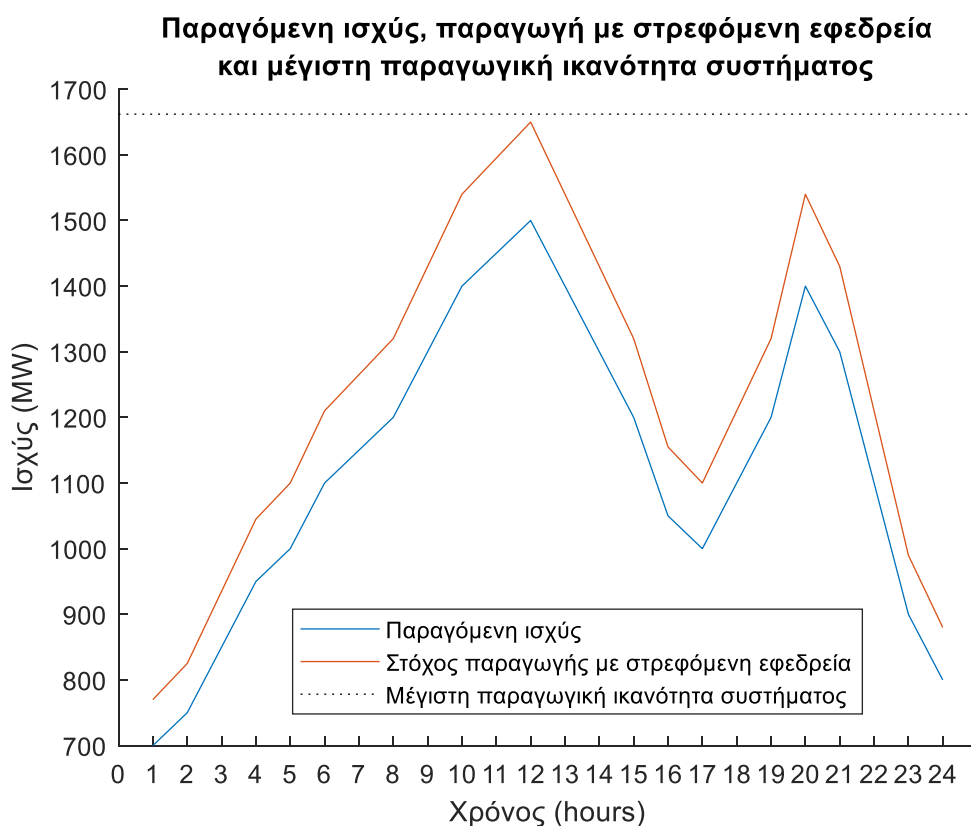
4.1 Πρόβλημα ένταξης μονάδων χωρίς όρια κλίσης (ramp rates)

Σύμφωνα με το μαθηματικό – υπολογιστικό μοντέλο βασιζόμενοι στο Case Study των 10 μονάδων παραγωγής μπορούμε να δημιουργήσουμε μεγαλύτερα συστήματα όπως 20 και 40 μονάδων αντιγράφοντας το πρότυπο όσες φορές είναι αναγκαίο, πχ. δύο φορές για το σύστημα 20 μονάδων και τέσσερις φορές για το σύστημα των 40 μέσω της παραμέτρου DM (Dimension Multiplier) που περιγράφεται από την Σχέση (3.3.5). Αντίστοιχα η ζήτηση του φορτίου από το δίκτυο πολλαπλασιάζεται με τον ίδιο αριθμό για να φτάσει τα επιθυμητά επίπεδα και το όριο της στρεφόμενης εφεδρείας λαμβάνεται ίσο με το 10% της ζήτησης για κάθε χρονική περίοδο λειτουργίας του συστήματος.

4.1.1 Σύστημα 10 μονάδων παραγωγής

Για το σύστημα 10 μονάδων χρησιμοποιούνται 4 τμήματα (segments) στην τμηματική γραμμική προσέγγιση (piecewise linear approximation) του κόστους παραγωγής και 15 διαστήματα στην βηματική (stairwise) συνάρτηση κόστους εκκίνησης, αριθμός που παρέμεινε σταθερός σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η παραγόμενη ισχύς που ταυτίζεται με την ζήτηση φορτίου από το δίκτυο, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς καθώς και η προβλεπόμενη παραγωγή με απαίτηση της στρεφόμενης εφεδρείας.



Σχήμα 4-1: Παραγόμενη ισχύς, στόχος παραγωγής με απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας και μέγιστη παραγωγική ικανότητα συστήματος συναρτήσει του χρόνου για σύστημα 10 μονάδων

Όπως βλέπουμε, για όλες τις περιόδους το σύστημα είναι ικανό να αντεπεξέλθει στην ζήτηση φορτίου από το δίκτυο σεβόμενο την απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας. Ως αποτέλεσμα, μηδενίζεται η πιθανότητα προβλήματος στην παροχή, με δεδομένο ότι οι μονάδες λειτουργούν κατά τον ενδεδειγμένο τρόπο.

Με χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης intlinprog της Matlab καταλήγουμε στην παρακάτω λύση για υπολογιστικό χρόνο 10 δευτερολέπτων. Οι πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζουν το πρόγραμμα των μονάδων για κάθε περίοδο παραγωγής, όπου στον Πίνακα (4-1) εμφανίζεται ποιες είναι σε λειτουργία με την ένδειξη 1 και αντίστοιχα οι εκτός λειτουργίας με 0. Στον Πίνακα (4-2) εμφανίζονται τα ποσά ισχύος που προσφέρει κάθε μονάδα για κάθε περίοδο και στην τελευταία στήλη το άθροισμα ισχύος το οποίο ταυτίζεται και με την ζήτηση φορτίου (Σχήμα 3-7).

Πίνακας 4-1: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4-2: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής (MW)

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
2	245,0	295,0	370,0	455,0	390,0	360,0	410,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	310,0	260,0	360,0	455,0	455,0	455,0	455,0	425,0	345,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	25,0	40,0	25,0	25,0	25,0	30,0	85,0	162,0	162,0	162,0	162,0	85,0	30,0	25,0	25,0	25,0	30,0	162,0	85,0	145,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	33,0	73,0	80,0	33,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,0	20,0	20,0	20,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	43,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SUM	700	750	850	950	1000	1100	1150	1200	1300	1400	1450	1500	1400	1300	1200	1050	1000	1100	1200	1400	1300	1100	900	800

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την παραπάνω βέλτιστη λύση προκύπτει ίση με **563.948,83 \$**, η οποία παρουσιάζει μηδενικό σχετικό σφάλμα.

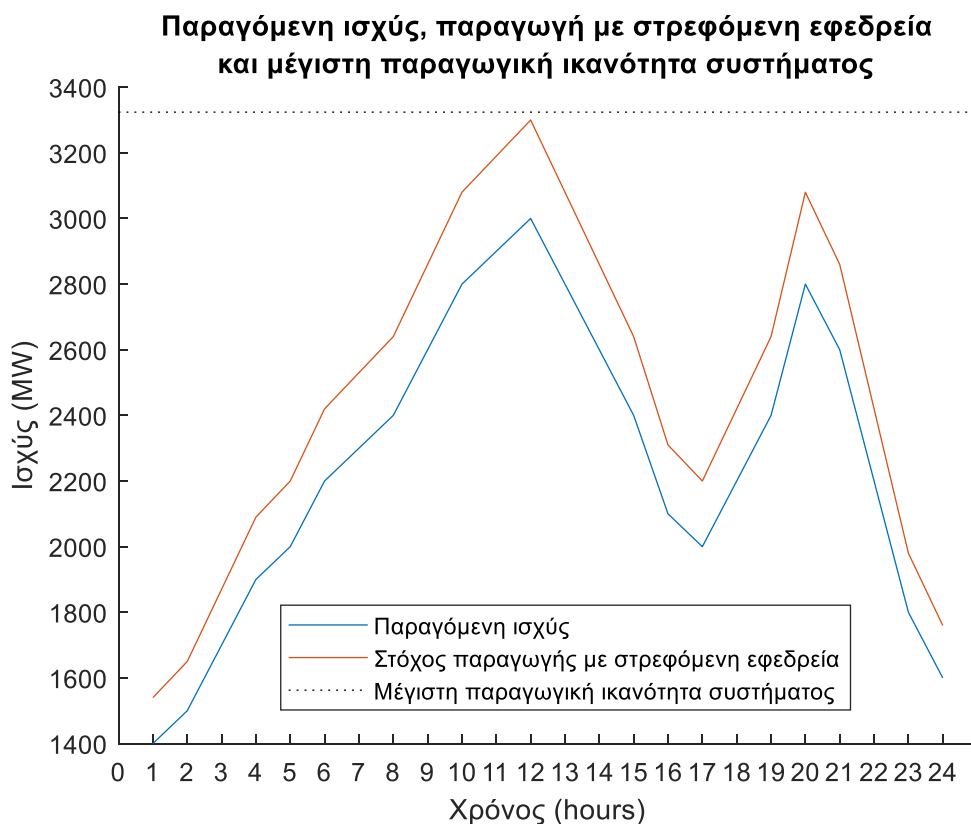
Ωστόσο, κατά την βελτιστοποίηση του προβλήματος ένταξης μονάδων με μεικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό χρησιμοποιείται η καθαρά γραμμική έκφραση κόστους (Σχέση 2.3.3) στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή η έκφραση αποτελεί μια προσέγγιση της καμπύλης που εκφράζει το κόστος παραγωγής και παρουσιάζει απόκλιση από την βέλτιστη λύση. Έχοντας υπολογίσει με τον παραπάνω τρόπο την κατάσταση των μονάδων και τα ποσά ισχύος που παράγονται σε κάθε περίοδο, στην συνέχεια χρησιμοποιούνται ως είσοδος στην τετραγωνική έκφραση του κόστους παραγωγής (Σχέση 2.3.2). Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ανεξαρτητοποίηση από το πλήθος των τμημάτων γραμμικοποίησης και η ακριβέστερη προσέγγιση της λύσης. Επομένως καταλήγουμε με αριθμητικό υπολογισμό σε συνολικό κόστος **563.937,68 \$**.

Οι τιμές του συνολικού κόστους παρουσιάζουν μικρή απόκλιση ακόμα και για μόλις 4 τμήματα στην τμηματική συνάρτηση κόστους παραγωγής (piecewise linear production cost function). Περαιτέρω ανάλυση της αλληλεπίδρασης των τμημάτων με την τελική λύση θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο (4.2).

4.1.2 Σύστημα 20 μονάδων παραγωγής

Για το σύστημα 20 μονάδων παραγωγής ήταν αδύνατη η απόλυτη σύγκλιση με μηδενικό σχετικό σφάλμα. Για αυτόν τον λόγο, έγινε διερεύνηση παραλλαγών ως προς το πλήθος των διαστημάτων (4, 6, 8, 10 και 12) της τμηματικής συνάρτησης παραγωγής και παρατηρήθηκε βέλτιστη λύση για 8 διαστήματα (segments) με μικρή απόκλιση από την πρότυπη.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται αντίστοιχο διάγραμμα (Σχήμα 4-2) του συστήματος 20 μονάδων που παρουσιάζει την παραγόμενη ισχύ που ταυτίζεται με την ζήτηση φορτίου από το δίκτυο, τη προβλεπόμενη παραγωγή με απαίτηση της στρεφόμενης εφεδρείας, καθώς και τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ. Όπως είναι φυσιολογικό, εμφανίζει ίδια συμπεριφορά με το σύστημα 10 μονάδων, όντας διπλάσια για κάθε περίοδο.



Σχήμα 4-2: Παραγόμενη ισχύς, στόχος παραγωγής με απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας και μέγιστη παραγωγική ικανότητα συστήματος συναρτήσει του χρόνου για σύστημα 20 μονάδων

Οι Πίνακες (4-3) και (4-4) απεικονίζουν τον προγραμματισμό που αντιστοιχεί στο σύστημα 20 μονάδων με τον τελευταίο στην τελευταία σειρά να εμφανίζει το άθροισμα προσφοράς ισχύος για κάθε περίοδο που ταυτίζεται με την αντίστοιχη ζήτηση.

Πίνακας 4-3: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 20 μονάδων

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
10	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Πίνακας 4-4: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 20 μονάδων (MW)

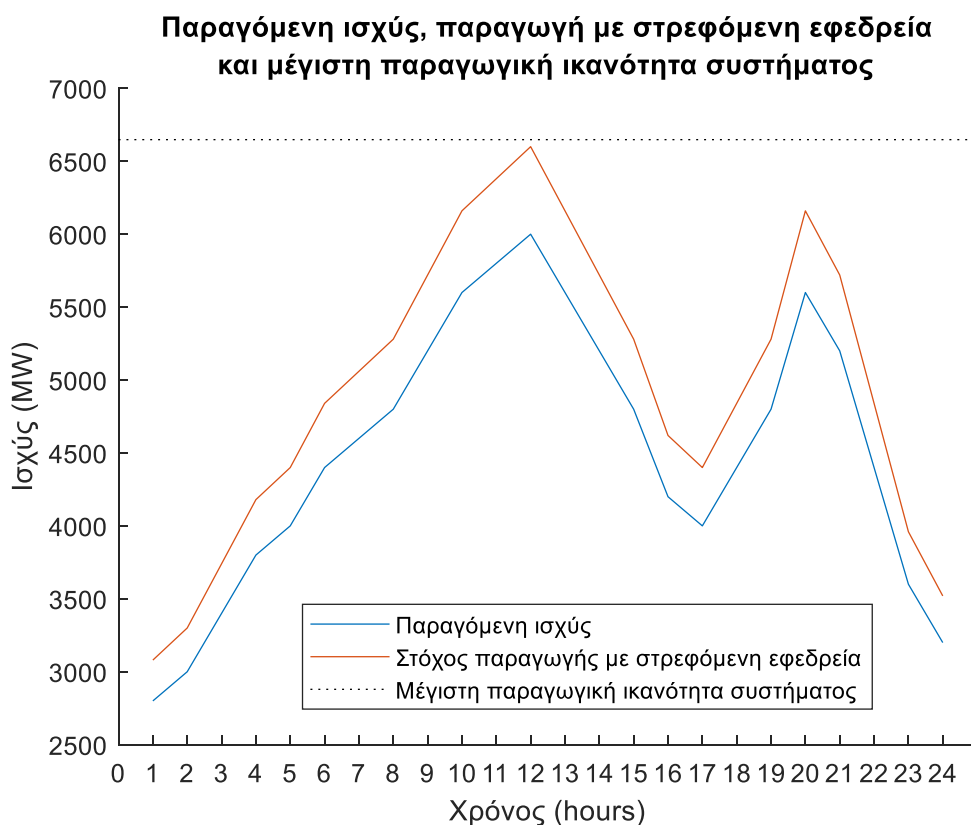
Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
2	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
3	226,3	302,5	378,8	380,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	317,5	293,8	378,8	455,0	455,0	455,0	455,0	410,0	311,3
4	263,8	287,5	386,3	455,0	455,0	395,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	302,5	226,3	341,3	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	378,8
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	59,3	25,0	93,5	162,0	162,0	162,0	162,0	93,5	25,0	25,0	25,0	25,0	35,0	162,0	93,5	116,5	25,0	0,0
10	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	30,8	35,0	101,5	162,0	162,0	162,0	162,0	101,5	35,0	25,0	25,0	25,0	25,0	162,0	116,5	93,5	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	35,0	80,0	80,0	35,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,0	20,0	20,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	31,0	66,0	80,0	31,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	20,0	20,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	42,3	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	43,8	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SUM	1400	1500	1700	1900	2000	2200	2300	2400	2600	2800	2900	3000	2800	2600	2400	2100	2000	2200	2400	2800	2600	2200	1800	1600

Μέσω του αλγορίθμου καταλήγουμε σε γραμμικό συνολικό κόστος **1.123.303 \$** ενώ με χρήση της τετραγωνικής έκφρασης κόστους παραγωγής (Σχέση 2.3.2) **1.123.299,74 \$** με απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο 337,31 δευτερόλεπτα και ένδειξη της Matlab σχετικό σφάλμα 0,337 %.

4.1.3 Σύστημα 40 μονάδων παραγωγής

Το σύστημα 40 μονάδων παρουσίασε αυξημένο υπολογιστικό κόστος, με την μέθοδο Branch and Bound να μην καταφέρνει να φέρει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε επίπεδα σχετικού σφάλματος κάτω του 1%. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έγινε χρήση αρχικής τιμής, επιλογή που εντάχθηκε στην συνάρτηση `intlinprog` στην έκδοση R2018a. Για την εξαγωγή αρχικής τιμής έγινε χρήση της λύσης του πρότυπου συστήματος 10 μονάδων, η οποία προσαρμόστηκε κατάλληλα με αναπαραγωγή των στοιχείων του εκάστοτε πίνακα. Επιπλέον, για εκμετάλλευση των αρχικών μεθόδων της `intlinprog` καθώς στο στάδιο του Branch and Bound παρουσιάστηκε εκ νέου αδυναμία επίλυσης σε αποδεκτό σχετικό σφάλμα, πραγματοποιήθηκαν 3 τρεξίματα της `intlinprog` όπου τα τελικά αποτελέσματα κάθε τρεξίματος αποτελούσε την αρχική λύση του επόμενου.

Παρακάτω κατ' αντιστοιχία των Κεφαλαίων 4.1.1 και 4.1.2 εμφανίζεται το διάγραμμα που απεικονίζει την παραγόμενη ισχύ που ταυτίζεται με την ζήτηση φορτίου από το δίκτυο, τη προβλεπόμενη παραγωγή με απαίτηση της στρεφόμενης εφεδρείας, τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ και οι πίνακες προγραμματισμού για σύστημα 40 μονάδων.



Σχήμα 4-3: Παραγόμενη ισχύς, στόχος παραγωγής με απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας και μέγιστη παραγωγική ικανότητα συστήματος συναρτήσει του χρόνου για σύστημα 40 μονάδων

Το συνολικό γραμμικό κόστος προκύπτει ίσο με **2.245.978,064 \$** ενώ το αντίστοιχο μέσω της τετραγωνικής έκφρασης **2.245.974,837 \$**.

Πίνακας 4-5: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 40 μονάδων

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
10	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
12	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
13	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
14	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
15	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
16	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
17	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
18	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
19	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
24	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
30	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
31	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4-6: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 40 μονάδων (MW)

Μον.	Περίοδοι																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	
2	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	
3	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	
4	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	
5	264,4	290,6	378,8	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	416,9	378,8	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	340,6	308,8
6	263,1	302,5	378,8	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	379,4	340,6	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	340,6	340,6
7	226,3	264,4	378,8	416,9	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	416,9	370,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	368,1	340,6
8	226,3	302,5	413,7	443,1	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	416,9	340,6	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	340,6	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	59,3	42,1	59,3	100,2	162,0	162,0	162,0	162,0	93,5	93,5	25,0	25,0	25,0	110,6	162,0	93,5	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	52,3	42,1	59,3	110,6	162,0	162,0	162,0	162,0	110,6	93,5	25,0	25,0	35,0	100,2	162,0	100,2	25,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	59,3	42,1	59,3	110,6	162,0	162,0	162,0	162,0	110,6	107,4	25,0	25,0	25,0	93,5	162,0	110,6	40,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	59,2	53,6	47,2	93,5	162,0	162,0	162,0	162,0	100,3	110,6	25,0	25,0	25,0	110,6	162,0	110,6	25,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	35,0	74,5	80,0	34,5	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42,5	20,0	20,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	35,0	72,5	80,0	35,0	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	42,5	20,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	34,5	72,5	80,0	35,0	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	39,5	20,0	0,0	0,0	0,0
24	0,0	20,0	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	27,5	72,5	80,0	27,5	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	42,5	20,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,8	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	43,8	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	43,8	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	43,8	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
33	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
34	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
36	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
39	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0
40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SUM	2800	3000	3400	3800	4000	4400	4600	4800	5200	5600	5800	6000	5600	5200	4800	4200	4000	4400	4800	5600	5200	4400	3600	3200	0,0

4.1.4 Συγκριτικά αποτελέσματα με διάφορες λύσεις του προβλήματος ένταξης μονάδων

Το Case Study που εμφανίζεται στην παρούσα εργασία (Kazarlis, et al. 1996) χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία για αξιολόγηση της απόδοσης νέων αλγορίθμων επίλυσης του ΠΕΜ. Όπως αναφέρθηκε στην Υποενότητα (1.3.3.1) οι Viana και Pedroso (Viana and Pedroso 2013) παρουσίασαν μια εργασία όπου με μια δυναμική μέθοδο αύξησης των τμημάτων την γραμμικής προσέγγισης της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους παραγωγής κατέληξαν στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα (4-7) χωρίς την χρήση της τετραγωνικής έκφρασης του κόστους παραγωγής. Πλέον, σε ερευνητικό επίπεδο τα συγκεκριμένα αποτελέσματα θεωρούνται τα βέλτιστα.

Πίνακας 4-7: Βέλτιστες λύσεις με χρήση μεικτού ακέραιου προγραμματισμού και επίλυση μέσω CPLEX

(πηγή, Viana and Pedroso 2013)

Units	Συνολικό Κόστος (\$)	Υπολογιστικός Χρόνος (s)
10	563.937,7	0,58
20	1.123.297,4	16,4
40	2.242.575,4	960

Στην συνέχεια στον Πίνακα 4-8 παρουσιάζονται λύσεις από την διεθνή βιβλιογραφία, για το ίδιο σύστημα με σκοπό την σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Όπως παρατηρούμε τα αποτελέσματα κυμαίνονται σε σχετικά κοντινό επίπεδο με την μέθοδο του ΜΑΓΠ με την intlinprog να φτάνει πολύ κοντά στην βέλτιστη λύση ειδικά μέχρι το σύστημα και των 20 μονάδων. Κάθε μέθοδος παρουσιάζεται στην αντίστοιχη εργασία: MA (Valenzuela and Smith, 2002), SA (Simopoulos, et al. 2006), EPSO (Yuan, et al. 2011), IBPSO (Yuan, et al. 2009), QEA (Lau, et al. 2009), BGSA (Yuan, et al. 2014).

Πίνακας 4-8: Προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με διάφορες μεθόδους για συστήματα 10, 20 και 40 μονάδων

	N = 10		N = 20		N = 40	
	Κόστος (\$)	Χρόνος (s)	Κόστος (\$)	Χρόνος (s)	Κόστος (\$)	Χρόνος (s)
MA	566.686	61	1.128.192	113	2.249.589	217
SA	565.828	3	1.126.251	17	2.250.508	88
EPSO	563.938	7	1.123.773	16	2.244.772	36
IBPSO	563.977	27	1.125.216	55	2.248.581	110
QEA	563.938	19	1.123.607	28	2.245.557	28
BGSA	563.938	-	1.123.996	-	2.246.445	-
MILP (Quad)	563.937,7	10	1.123.299,74	337	2.245.974,84	4500

4.2 Επίδραση του πλήθους των διαστημάτων (segments) της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης κόστους παραγωγής (piecewise linear production cost function) στο συνολικό γραμμικό κόστος

Η χρήση τμηματικής γραμμικής συνάρτησης (piecewise linear function) για την γραμμικοποίηση της τετραγωνικής συνάρτησης του κόστους παραγωγής αποτελεί μια αριθμητική προσέγγιση. Όπως είναι λογικό, όσα περισσότερα τμήματα (segments) χρησιμοποιούνται τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση, ωστόσο παράλληλα αυξάνεται και το υπολογιστικό κόστος. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η δυνατότητα χρήσης της τετραγωνικής έκφρασης ανεξαρτητοποιώντας το αποτέλεσμα από τον αριθμό των τμημάτων.

Στον Πίνακα (4-9) παρουσιάζεται μια μελέτη του συνολικού κόστους με χρήση τμηματικά γραμμικής προσέγγισης του κόστους παραγωγής συναρτήσει του αριθμού των τμημάτων που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 4-9: Γραμμικό συνολικό κόστος παραγωγής συναρτήσει του αριθμού των τμημάτων (segments) της γραμμικής προσέγγισης

nNL (segments)	Συνολικό Κόστος (\$)	Υπολογιστικός Χρόνος (s)
4	563.948,83	10,38
5	563.945,02	16,53
6	563.943,03	12,24
7	563.940,90	11,63
8	563.940,58	10,82
10	563.939,58	142
20	563.938,17	11,02
30	563.937,86	23,08
40	563.937,81	15,94
50	563.937,74	82,84

Παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται το πλήθος των γραμμικών τμημάτων τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η βέλτιστη λύση του προβλήματος που έχει παρουσιαστεί στην Υποενότητα (4.1.4). Επίσης, ο χρόνος επίλυσης παρουσιάζει διακυμάνσεις με μεγαλύτερη τιμή για τα 10 τμήματα και αμέσως μετά για τα 50. Δεν υπάρχει αναλογική αύξηση του υπολογιστικού κόστους ωστόσο αυξάνεται ο χρόνος μοντελοποίησης λόγω μεγαλύτερων διαστάσεων στους πίνακες αποθήκευσης των μεταβλητών και των περιορισμών.

4.3 Πρόβλημα ένταξης μονάδων με όρια κλίσης (ramp rates)

4.3.1 Αποτελέσματα συστήματος 10 μονάδων

Η προσθήκη των ορίων κλίσης στο πρόβλημα ένταξης μονάδων φέρνει το μοντέλο πιο κοντά στην πραγματική εφαρμογή αλλά ταυτόχρονα αυξάνει την πολυπλοκότητα του. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα (3-8) για τις τιμές των ορίων κλίσης και την ταυτόχρονη μη σύνδεσή τους με την στρεφόμενη εφεδρεία καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες (4-10 έως 4-13).

Για την μοντελοποίηση του συστήματος 10 μονάδων χρησιμοποιήθηκαν 4 τμήματα (segments) της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης του κόστους παραγωγής.

Πίνακας 4-10: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με όρια κλίσης (ramp rates)

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4-11: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με όρια κλίσης (ramp rates) (MW)

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
2	245,0	295,0	370,0	455,0	390,0	360,0	402,6	420,2	423,2	455,0	455,0	455,0	455,0	414,8	420,2	329,2	260,0	327,6	395,2	455,0	443,4	455,0	425,0	345,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	104,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	129,4	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	25,0	40,0	25,0	25,0	32,4	64,8	97,2	129,6	162,0	162,0	129,6	97,2	64,8	32,4	25,0	57,4	89,8	122,2	96,6	129,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,6	55,6	71,6	80,0	64,0	48,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,0	20,0	36,0	20,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	34,6	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,8	11,4	22,4	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,8	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	21,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Το γραμμικό συνολικό κόστος ανέρχεται στα **565.201,34 \$** σε 35 δευτερόλεπτα με μηδενικό σχετικό σφάλμα ενώ το αντίστοιχο κόστος μέσω της τετραγωνικής έκφρασης είναι **565.185,94 \$**.

Τα όρια κλίσης (ramp rates) αυξάνουν το συνολικό κόστος επηρεάζοντας το κόστος παραγωγής ενέργειας και ταυτόχρονα και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο. Ο λόγος για την παραπάνω αύξηση είναι ότι ως δυναμικοί περιορισμοί μειώνουν το εύρος που μπορεί να λειτουργήσει μια μονάδα την ώρα t βάσει της κατάστασης που βρίσκεται την ώρα $t-1$. Έτσι προκαλείται πιο ομαλή αυξομείωση της παραγόμενης ισχύος με την πάροδο των περιόδων.

4.3.2 Σύστημα 20 μονάδων παραγωγής

Αντίστοιχα για το σύστημα των 20 μονάδων χρησιμοποιήθηκαν 8 (segments) της τμηματικής γραμμικής συνάρτησης του κόστους παραγωγής όπως έγινε και στην περίπτωση χωρίς όρια κλίσης.

Πίνακας 4-12: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 20 μονάδων παραγωγής με όρια κλίσης (ramp rates)

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
7	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
9	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
10	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Πίνακας 4-13: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 20 μονάδων παραγωγής με όρια κλίσης (ramp rates) (MW)

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
2	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
3	226,3	302,3	386,3	455,0	455,0	416,9	455,0	417,7	448,7	455,0	455,0	455,0	455,0	437,7	423,5	332,5	255,6	340,6	416,9	455,0	455,0	455,0	431,6	340,6
4	263,7	287,7	378,7	455,0	455,0	433,1	455,0	416,9	416,9	455,0	455,0	455,0	455,0	416,9	416,9	325,9	264,4	334,7	393,7	455,0	455,0	455,0	423,5	349,4
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	104,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	104,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	128,8	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	25,0	42,1	25,0	25,0	42,1	70,6	103,0	135,4	162,0	162,0	129,6	97,2	64,8	32,4	25,0	57,4	89,8	122,2	95,3	127,8	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	37,9	25,0	25,0	47,9	64,8	97,2	129,6	162,0	162,0	129,6	97,2	64,8	32,4	25,0	37,3	69,7	102,1	69,7	67,2	34,8	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,5	56,5	72,5	80,0	64,0	48,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	58,5	42,5	27,5	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,7	54,7	70,7	80,0	64,0	48,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	58,5	42,5	27,5	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	55,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,8	12,8	23,8	12,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	55,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	15,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,7	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,6	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,0	10,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SUM	1400	1500	1700	1900	2000	2200	2300	2400	2600	2800	2900	3000	2800	2600	2400	2100	2000	2200	2400	2800	2600	2200	1800	1600

Για το σύστημα 20 μονάδων το γραμμικό συνολικό κόστος ανέρχεται στα **1.125.796,879 \$** σε 6585 δευτερόλεπτα με σχετικό σφάλμα 0,775 % ενώ το αντίστοιχο κόστος μέσω της τετραγωνικής έκφρασης είναι **1.125.788,727 \$**.

4.3.3 Συγκριτικά αποτελέσματα για διάφορους τρόπους επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με όρια κλίσης (ramp rates)

Αντλώντας στοιχεία από την διεθνή βιβλιογραφία, στον Πίνακα (4-14) παρουσιάζονται προσεγγίσεις του προβλήματος ένταξης μονάδων με ενσωμάτωση των ορίων κλίσης (ramp rates) με σκοπό την σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, κάθε μέθοδος εμφανίζεται στην αντίστοιχη εργασία: FSA-DP (Patra, et al. 2009), CPLEX και CUT & CPLEX (Zheng, et al. 2016), BRCGA (Datta 2013).

Πίνακας 4-14: Προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με όρια κλίσης (ramp rates) με διάφορες μεθόδους για συστήματα 10 και 20 μονάδων

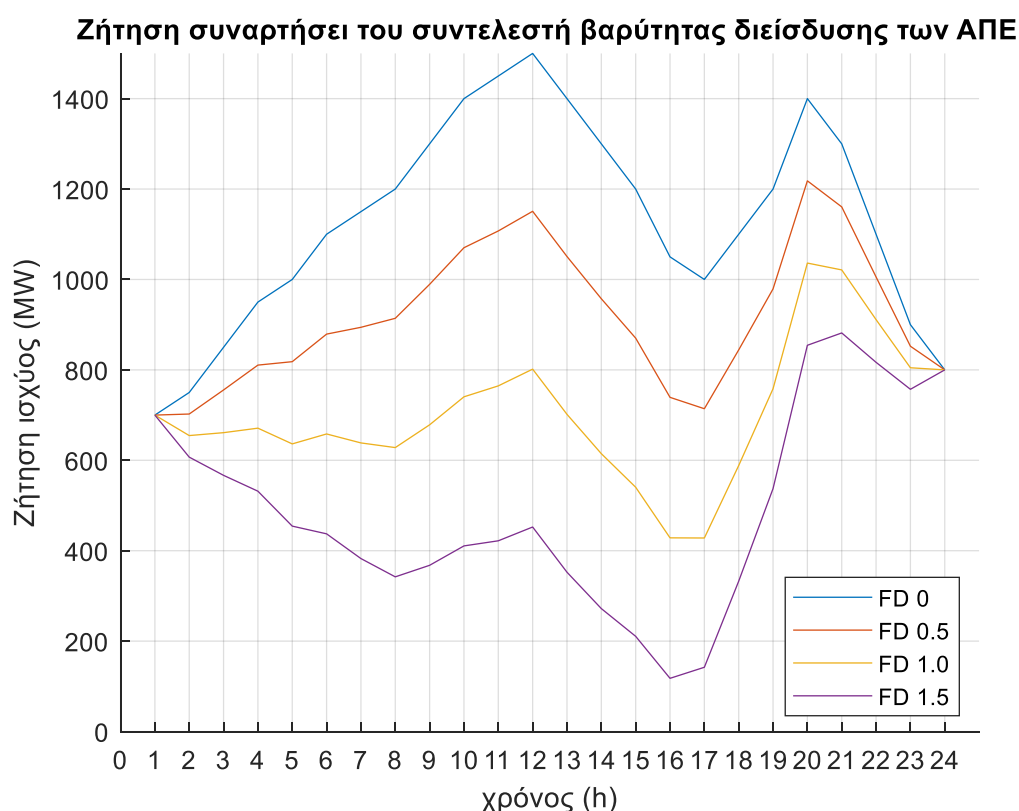
	N = 10		N = 20	
	Κόστος (\$)	Χρόνος (s)	Κόστος (\$)	Χρόνος (s)
FSA-DP	565.721	-	1.127.743	-
CPLEX	566.262	15,3	1.128.533	26,5
CUT&CPLEX	565.723	2,4	1.128.273	14,6
BRCGA	565.662	4,3	1.127.110	11
MILP (Quad)	565.185,94	35	1.125.788,727	6585

Όπως παρατηρούμε τα αποτελέσματα σε σχέση με τις αντίστοιχες έρευνες είναι καλύτερα όμως ο υπολογισμός τους απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο ειδικά στο μοντέλο των 20 μονάδων. Στο σύστημα των 40 μονάδων με την εισαγωγή των ορίων κλίσης (ramp rates) προκλήθηκε πολύ μεγάλη αύξηση του αριθμού των περιορισμών του προβλήματος, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να μην καταφέρει να εντοπίσει κάποια λύση με μικρό ποσοστό απόκλισης.

4.4 Πρόβλημα ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

4.4.1 Αποτελέσματα προβλήματος ένταξης μονάδων με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Με την διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται η ζήτηση φορτίου που καλούνται να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες. Η ντετερμινιστική μέθοδος που υιοθετεί η παρούσα εργασία ορίζει μέσω μιας ημιτονικής συνάρτησης την υπολειπόμενη ζήτηση που αντιστοιχεί στην συμβατική παραγωγή και εξαρτάται από τον συντελεστή βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα, FD (Delarue, et al. 2013). Στο Σχήμα (4-4) απεικονίζεται η υπολειπόμενη ζήτηση συναρτήσει του συντελεστή βαρύτητας FD.



Σχήμα 4-4: Ζήτηση που καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες ύστερα από την διείσδυση των ΑΠΕ

Στην συνέχεια οι Πίνακες (4-14) έως (4-19) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του προβλήματος ένταξης μονάδων με διείσδυση των ΑΠΕ για τις παραπάνω τιμές του συντελεστή βαρύτητας διείσδυσης FD. Όσο αυξάνεται η τιμή του FD το πρόβλημα ανάγεται σε πρόβλημα χαμηλής υπολειπόμενης ζήτησης, το οποίο υπολογιστικά με την μεθόδου του ΜΑΓΠ παρουσιάζει δυσκολίες ειδικά για μεγαλύτερα συστήματα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μόνο το σύστημα 10 μονάδων (4 segments) με μηδενικό σχετικό για όλες τις περιπτώσεις και μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ.

Πίνακας 4-15: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ, FD = 0,5

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4-16: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ (MW), FD = 0,5

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
2	245,0	247,3	300,6	355,6	338,1	399,1	414,2	434,1	379,2	440,2	455,0	455,0	420,8	455,0	390,2	259,2	234,1	364,2	369,1	455,0	455,0	400,6	267,3	345,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	47,3	80,8	25,0	27,3	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	138,1	90,6	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	20,0	20,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SUM	700,0	702,3	755,6	810,6	818,1	879,1	894,2	914,1	989,2	1070,2	1107,3	1150,8	1050,8	957,3	870,2	739,2	714,1	844,2	979,1	1218,1	1160,6	1005,6	852,3	800,0

Το συνολικό γραμμικό κόστος παραγωγής ανέρχεται στα **444.202,29 \$** ενώ το αντίστοιχο κόστος μέσω της τετραγωνικής έκφρασης είναι **444.192,45 \$**. Η λύση προκύπτει σε 95 δευτερόλεπτα. Συγκριτικά με το σύστημα με καθαρά συμβατικές μονάδες παρατηρούμε πως πλέον την 12η περίοδο που παρουσιάζεται και η μεγαλύτερη ζήτηση δεν είναι σε λειτουργίας όλες οι μονάδες. Οι μονάδες 3, 7 και 10 δεν θέτονται καθόλου σε λειτουργία ενώ οι πρώτες 2 συνεχίζουν να λειτουργούν σε όλη την διάρκεια του εικοσιτετραώρου απλά με χαμηλότερη παραγωγή.

Πίνακας 4-17: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ, FD = 1,0

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4-18: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ (MW), FD = 1,0

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	390,4	278,5	278,1	438,4	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
2	245,0	199,7	206,1	216,1	181,3	203,2	183,4	173,1	223,5	285,4	309,6	336,6	246,6	159,6	150,0	150,0	150,0	303,2	455,0	455,0	411,1	324,7	320,0	
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	96,3	91,1	25,0	25,0	25,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	20,0	20,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SUM	700,0	654,7	661,1	671,1	636,3	658,2	638,4	628,1	678,5	740,4	764,6	801,6	701,6	614,6	540,4	428,5	428,1	588,4	758,2	1036,3	1021,1	911,1	804,7	800,0

Στην περίπτωση που ο συντελεστής βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ είναι $FD = 1$ το συνολικό γραμμικό κόστος είναι ίσο με **338.085,05 \$** και υπολογίζεται σε 26 δευτερόλεπτα ενώ το αντίστοιχο κόστος μέσω της τετραγωνικής έκφρασης είναι **338.076,74 \$**. Σε σύγκριση με το σύστημα καθαρά συμβατικής παραγωγής, παρατηρούμε πως λειτουργούν κυρίως οι 2 πρώτες μονάδες (μονάδες βάσεις) οι οποίες δεν θέτονται σε καμία περίοδο εκτός λειτουργίας και αντιθέτως οι μονάδες 3, 4, 7, 9 και 10 δεν εκκινούν ποτέ.

Πίνακας 4-19: Κατάσταση μονάδων σε κάθε περίοδο για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ, FD = 1,5

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4-20: Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων παραγωγής με διείσδυση ΑΠΕ (MW), FD = 1,5

Μον.	Περίοδοι																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	455,0	455,0	416,7	381,7	429,4	412,4	357,6	317,2	342,7	385,6	397,0	427,4	327,4	247,0	185,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	245,0	152,0	150,0	150,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	177,6	382,4	455,0	455,0	455,0	455,0	455,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	92,7	117,2	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0	130,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	109,4	136,7	81,7	42,0	75,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	20,0	20,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	0,0	0,0	10,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SUM	700,0	607,0	566,7	531,7	454,4	437,4	382,6	342,2	367,7	410,6	422,0	452,4	352,4	272,0	210,6	117,7	142,2	332,6	537,4	854,4	881,7	816,7	757,0	800,0

Τέλος για την περίπτωση χαμηλής υπολειπόμενης ζήτησης με συντελεστή βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ, FD = 1,5 το συνολικό γραμμικό κόστος είναι ίσο με **256.252,7 \$** και απαιτεί 115 δευτερόλεπτα για τον υπολογισμό του ενώ το αντίστοιχο κόστος μέσω της τετραγωνικής έκφρασης είναι **256.238,57 \$** . Η συγκεκριμένη περίπτωση επαληθεύει το γεγονός ότι με αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ η χρήση των δύο πρώτων μονάδων, που αποτελούν τις μονάδες βάσης, μειώνεται σημαντικά και αντικαθίστανται από τις μεσαίες (intermediate) μονάδες. Αυτές είναι πιο ευέλικτες όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας τους και άρα μπορούν να ανταποκριθούν στο βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται με την διείσδυση των ΑΠΕ που είναι η μεγάλη μεταβλητότητα ως προς την παραγόμενη ενέργεια.

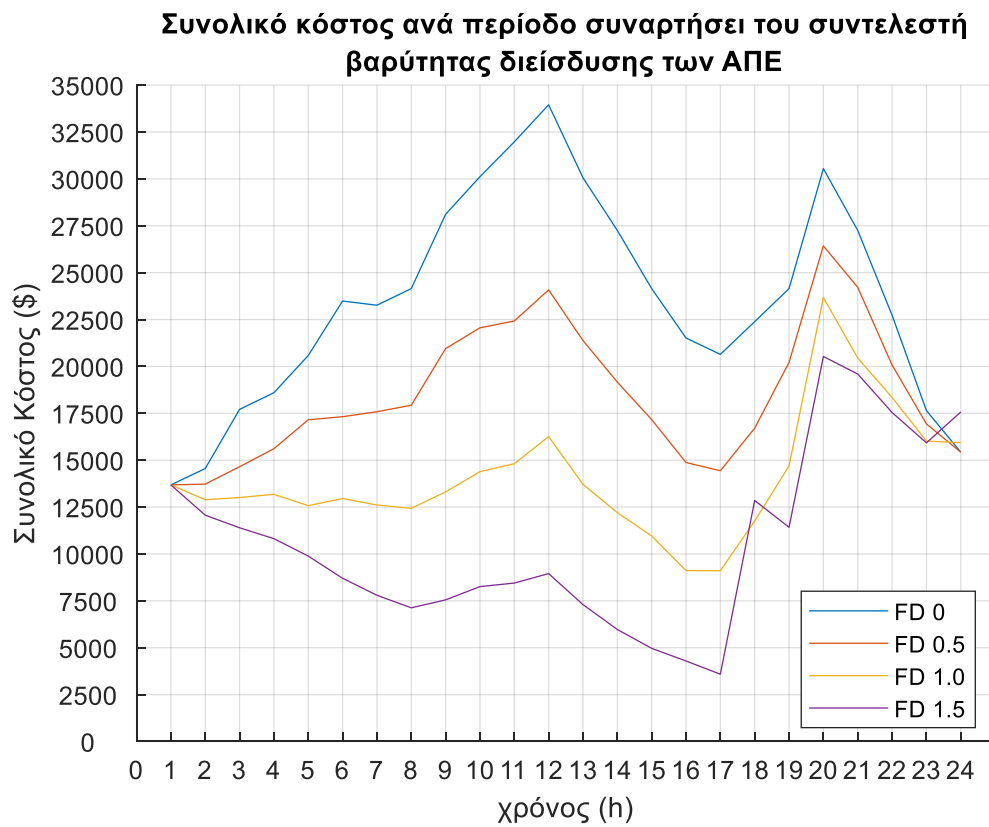
4.4.2 Σύγκριση συνολικού κόστους με διείσδυση ΑΠΕ και παραγωγής με συμβατικές μονάδες

Με την μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα Κεφάλαια (4.1.1) και (4.4.1) μπορούμε να βγάλουμε πόρισμα σχετικά με την εξοικονόμηση κόστους που πραγματοποιείται με χρήση ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για σύστημα 10 μονάδων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις 2 περιπτώσεις και η αντίστοιχη εξοικονόμηση – κέρδος. Σημειώνεται πως το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ έχει ληφθεί ίσο με 0.

Πίνακας 4-21: Σύγκριση συνολικού κόστους παραγωγής με συμβατικές μονάδες και διείσδυση ΑΠΕ για το σύστημα 10 μονάδων

Κόστος συμβατικής παραγωγής (\$)	FD (Συντελεστής βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ)	Κόστος παραγωγής με ΑΠΕ (\$)	Κέρδος (\$)
563.937,7	0,5	444.192,5	119.745,2
	1,0	338.076,7	225.861
	1,5	256.238,6	307.699,1

Στο Σχήμα (4-5) παρουσιάζεται μια γραφική απεικόνιση του συνολικού κόστους για κάθε περίοδο που προκύπτει για το σύστημα 10 μονάδων είτε με συμβατική παραγωγή που αντιστοιχεί σε συντελεστή βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ, $FD=0$ είτε με διείσδυση των ΑΠΕ. Παρατηρούμε πως στις 3 πρώτες περιπτώσεις όση περισσότερη διείσδυση των ΑΠΕ υπάρχει τόσο περισσότερο κατά προσέγγιση μετατοπίζεται προς τα κάτω η καμπύλη του κόστους (χωρίς να παραμένει απόλυτα παρόμοια). Στην τελευταία περίπτωση, για $FD = 1,5$ υπάρχουν περίοδοι όπου το επιμέρους κόστος είναι μεγαλύτερο από την αντίστοιχη καμπύλη για $FD = 1$ αλλά όπως φαίνεται και στον Πίνακα (4-19) το συνολικό κόστος μειώνεται όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ.



Σχήμα 4-5: Συνολικό κόστος ανά περίοδο συναρτήσεως του συντελεστή βαρύτητας διείδυσης των ΑΠΕ

4.5 Συμπεράσματα

Ύστερα από την μοντελοποίηση του PEM και με την επίλυσή του με χρήση της εσωτερικής συνάρτησης μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού `intlinprog` της Matlab μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα. Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι γίνει επισήμανση και σχολιασμός κάποιων σημαντικών επιμέρους σημείων που αφορούν το PEM ως θεωρία και εφαρμογή αλλά και τον υπολογιστικό τρόπο ο οποίος υιοθετήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

4.5.1 Συμπεράσματα για το πρόβλημα ένταξης μονάδων

Παρατηρούμε για τα συστήματα που μελετήθηκαν πως σε όλες τις περιπτώσεις τηρούνται όλοι οι περιορισμοί, είτε οικονομικοί είτε θερμικοί ενώ προσφέρεται για κάθε περίοδο το απαραίτητο φορτίο στο σύστημα. Έτσι, αναγνωρίζουμε πως τηρούντων των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, σε κάθε περίπτωση η αξιοπιστία του συστήματος είναι σε πολύ καλό επίπεδο και μέσω του μοντέλου είναι ικανός ο προγραμματισμός της παραγωγής.

4.5.2 Συμπεράσματα για τα αποτελέσματα

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 αναγνωρίζουμε πως η αύξηση του αριθμού των μονάδων επιφέρει σημαντική αλλαγή στην πολυπλοκότητα του συστήματος. Ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται αρκετά χωρίς να ακολουθεί ακριβώς ούτε γραμμική ούτε εκθετική αύξηση. Το συνολικό κόστος αυξάνεται αναλογικά με το πλήθος των μονάδων παραγωγής και παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα ως προς την απόκλιση με τις βέλτιστες τιμές όπως φάνηκε και από την σύγκριση με ανάλογες προσεγγίσεις (Πίνακες 4-8 και 4-14).

Ο μεικτός ακεραίος γραμμικός προγραμματισμός απαιτεί όλες οι εκφράσεις του μοντέλου, είτε τα μεγέθη που εισάγονται στην αντικειμενική συνάρτηση είτε οι περιορισμοί να είναι καθαρά γραμμικά, γεγονός που απαιτεί την προσέγγιση μέσω γραμμικοποίησης κάποιων ποσοτήτων όπως τα κόστη. Η συνάρτηση που παρατηρήσαμε ότι είχε άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα ήταν αυτή του κόστους παραγωγής στην οποία επιβλήθηκε τμηματική γραμμική προσέγγιση (*piecewise linear approximation*). Ο αριθμός των τμημάτων (*segments*) επηρεάζει εμφανώς το συνολικό κόστος, γεγονός που ωστόσο εξαλείφεται με την χρήση της τετραγωνικής έκφρασης του κόστους παραγωγής αφού έχει υπολογιστεί το τελικό πρόγραμμα παραγωγής (κατάσταση λειτουργίας και παραγόμενη ενέργεια από τις μονάδες) και με δεδομένη πλέον την παραγόμενη ισχύ. Με χρήση 8 τμημάτων και παραπάνω η διαφορά ελαχιστοποιείται σε αποδεκτά επίπεδα για τα συστήματα των 10, 20 και 40 μονάδων.

Η ενσωμάτωση των ορίων κλίσης (ramp rates) στο μοντέλο ως δυναμικός περιορισμός αυξάνει την πολυπλοκότητα και το καθιστά πιο δύσκολο διαχειρίσιμο, γεγονός που φαίνεται και στις σαφώς λιγότερες εργασίες διεθνούς βιβλιογραφίας που το μελετούν αλλά και από την χρονολογικά μεταγενέστερη εξαγωγή αποδεκτών λύσεων. Στην παρούσα εργασία για τα συστήματα 10 και 20 μονάδων παρατηρήσαμε πως με τα όρια κλίσης αυξάνεται το συνολικό κόστος κατά **1.248,2 \$** και **2.489 \$** αντίστοιχα. Ταυτόχρονα λόγω υψηλού υπολογιστικού κόστους καθίσταται δυσμενής η διαχείριση μεγαλύτερων συστημάτων από τον συγκεκριμένο αλγόριθμο.

Τέλος, η διείσδυση των ΑΠΕ επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην ζήτηση που καλούνται να παράγουν οι συμβατικές μονάδες (υπολειπόμενη ζήτηση φορτίου) και μειώνουν σημαντικά το κόστος όπως φαίνεται στον Πίνακα (4-21). Αυτό συμβαίνει επειδή το κόστος παραγωγής των ΑΠΕ είναι πρακτικά μηδενικό, με αποτέλεσμα να έχουν προτεραιότητα έναντι των συμβατικών μονάδων. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η διαμόρφωση του προγράμματος των συμβατικών μονάδων όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ, με εναλλαγή της χρήσης είτε των δύο πρώτων μονάδων (βάσης) είτε των μεσαίων (intermediate) ανάλογα την περίπτωση. Σε πιο σύνθετες εφαρμογές, αντί για την ντετερμινιστική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε, εντάσσεται στοχαστική μέθοδος μέσω πιθανοτικής διαμόρφωσης της ζήτησης με χρήση σεναρίων. Ταυτόχρονα επηρεάζεται η στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος δημιουργώντας ένα αρκετά πιο σύνθετο μαθηματικό μοντέλο και αλλάζοντας την τιμή του συνολικού κόστους.

4.5.3 Συμπεράσματα για το υπολογιστικό μοντέλο

Η υπολογιστική επίλυση του PEM σε αυτή την εργασία στηρίχθηκε στην εσωτερική συνάρτηση `intlinprog` της Matlab. Η συγκεκριμένη συνάρτηση αποτελεί μια σχετικά νέα μέθοδο που εντάχθηκε στην Matlab στην έκδοση R2014a με την Solver Based έκφραση που χρησιμοποιεί μια αρκετά πιο πινακοποιημένη μορφή ενσωμάτωσης όλων των δεδομένων. Η Problem Based έκδοση εμφανίστηκε με την έκδοση R2017b και αποτελεί μια πολύ φιλική μέθοδο γραφής ως προς τον χρήστη. Ουσιαστικά, η `intlingprog` αποτελεί μια συνάρτηση φτιαγμένη για επίλυση μικρών προβλημάτων μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) γεγονός που παρατηρείται και στον μεγάλο υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται σε μεγάλα συστήματα.

Στην πρώτη μορφή του προβλήματος χωρίς όρια κλίσης (ramp rates) παρατηρούμε μεγάλο υπολογιστικό χρόνο στα συστήματα 20 και 40 μονάδων και αδυναμία εύρεσης βέλτιστης λύσης με σχετικό σφάλμα ίσο με 0 όπως στην περίπτωση των 10 μονάδων. Συγκεκριμένα για τις 40 μονάδες ήταν αναγκαστική η χρήση αρχικής τιμής, ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει σε αποδεκτά όρια.

Στην περίπτωση του προβλήματος με όρια κλίσης (ramp rates) το σύστημα 10 μονάδων επιλύθηκε με επιτυχία, ενώ το σύστημα των 20 μονάδων χρειάστηκε πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα επίλυσης για να αποδώσει αποδεκτή λύση η οποία ωστόσο δεν είχε μηδενικό σχετικό σφάλμα.

Τα συστήματα διείσδυσης των ΑΠΕ εφόσον επιλύθηκαν για 10 μονάδες έδωσαν βέλτιστα αποτελέσματα με μηδενικό σχετικό σφάλμα ωστόσο λόγω μεγάλης αύξησης

υπολογιστικού κόστους σε μεγαλύτερα συστήματα σε περίπτωση χαμηλής υπολειπόμενης ζήτησης δεν καταστάθηκε δυνατή η αντίστοιχη εφαρμογή.

Σε γενικά πλαίσια η intlinprog αποτελεί μια πολύ καλή λύση λόγω της Problem Based έκφρασης και της ευκολίας γραφής του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της Matlab. Με τις προσθήκες των τελευταίων εκδόσεων φαίνεται πως υπάρχει τάση περαιτέρω ανάπτυξης με συνεχείς προσθήκες και βελτιώσεις σε κάθε καινούργια κυκλοφορία.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε κάποιες μορφές του προβλήματος δεν ήταν δυνατή η εύρεση των βέλτιστων λύσεων όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα (4-8) από (Viana and Pedroso, 2013). Στην συγκεκριμένη εργασία, γίνεται χρήση ΜΑΓΠ με δυναμική αύξηση των τμημάτων (segments) γραμμικοποίησης οπότε επιτυγχάνεται βέλτιστη λύση με χρήση γραμμικού κόστους και χρησιμοποιείται ως επιλύτης το CPLEX που αποτελεί τον πιο ευρέως διαδεδομένο επιλύτη βιομηχανικής χρήσης οπότε οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων θεωρούνται αποδεκτές.

5. Επίλογος

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων αποτελεί έναν πολύ σημαντικό κλάδο έρευνας με πολλές πρακτικές εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες. Κάθε εταιρία που διαχειρίζεται ή παράγει ηλεκτρική ενέργεια καλείται να βελτιστοποιήσει το μοντέλο που ακολουθεί με σκοπό να αυξήσει το κέρδος και την αξιοπιστία του συστήματος ελαχιστοποιώντας παράλληλα απώλειες, ρύπους, κλπ. Με το άνοιγμα της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και την ύπαρξη αυτόνομων συστημάτων παραγωγής είναι απαραίτητος ο κατάλληλος σχεδιασμός που θα αποφέρει ταυτόχρονα και μείωση χρήσης του καυσίμου έχοντας την βέλτιστη παραγωγή. Στην παρούσα εργασία έγινε επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με μελέτη σεναρίων όπως η μη ενσωμάτωση ορίων κλίσης (ramp rates), η ενσωμάτωση ορίων κλίσης (ramp rates) αλλά και με διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Προσδιορίστηκε το πρόγραμμα των μονάδων και τα ποσά παραγόμενης ισχύος για κάθε χρονική περίοδο με κύριο κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Το σύστημα επιλύθηκε για χρονικό ορίζοντα 24 ωριαίων περιόδων, για διάφορα πλήθη μονάδων παραγωγής με χρήση της συνάρτησης `intlinprog` του υπολογιστικού περιβάλλοντος της Matlab.

Η ενσωμάτωση ορίων κλίσης στο PEM επιφέρει αύξηση του συνολικού κόστους λόγω περιορισμού της παραγόμενης ισχύος με την πάροδο των περιόδων, δημιουργώντας ένα μοντέλο το οποίο βρίσκεται πιο κοντά σε πραγματικές συνθήκες. Αντίστοιχα, η διεύθυνση των ΑΠΕ στο σύστημα παραγωγής μειώνει σημαντικά το συνολικό κόστος καθιστώντας το ταυτόχρονα φιλικότερο προς το περιβάλλον.

6. Κατάλογος βιβλιογραφικών αναφορών

Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Gerald B. Sheblé-Power Generation, Operation and Control-Wiley-Interscience (2013)

Andersen, E. D., and Andersen, K. D. Presolving in linear programming. *Mathematical Programming* 71, pp. 221–245, 1995

Aoki K., Itoh M., Satoh T., Nara K., and Kanezashi M., “Optimal long-term unit commitment in large scale systems including fuel constrained thermal and pumped-storage hydro,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 1065–1073, Aug. 1989

Arroyo J. M. and A. J. Conejo, “Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 1098–1104, Aug. 2000

Arroyo J. M. and Conejo A. J., “A parallel repair genetic algorithm to solve the unit commitment problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, pp. 1216–1224, Nov. 2002

Brownlee Jason, “Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes”, PhD

Burns R. M. and Gibson C. A., “Optimization of priority lists for a unit commitment program,” in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, 1975

Carrión M. and J. M. Arroyo, “A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1371–1378, Aug. 2006

Chang G. W., Y. D. Tsai, C. Y. Lai, and J. S. Chung, “A practical mixed integer linear programming based approach of unit commitment,” in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Jun. 2004, vol. 1, pp. 221–225

Chang J. G., C.W., Waight, “A Mixed Integer Linear Programming Based Hydro Unit Commitment,” *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. pp. 924–928, 1999

Chang W. P., Luo X. J. A solution to the unit commitment using hybrid genetic algorithm. In: *Proceedings of 2008 IEEE Region 10 Conference*, Hyderabad, India, 2008, 1–6

Cohen A. I. and Yoshimura M., “A branch- and -bound algorithm for unit commitment,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, pp. 444–451, Feb. 1983

Cornuéjols, G. Valid inequalities for mixed integer linear programs. *Mathematical Programming B*, Vol. 112, pp. 3–44, 2008

Dasgupta D. and D. R. McGregor, “Thermal unit commitment using genetic algorithms,” *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist.*, vol. 141, pp. 459–465, Sept. 1994

Datta D., Unit commitment problem with ramp rate constraint using a binary-real-coded genetic algorithm, *Applied Soft Computing* 13 (9) (2013) 3873-3883

Delarue, E., Cattrysse, D., D' Haeseleer, W.: "Enhanced priority list unit commitment method for power systems with a high share of renewables. *Electric power Syst. Res.* 105, 115-123 (2013)

Dillon T. S., Edwin K. W., Kochs H. D. , Taud R. J. . Integer programming approach to the problem of optimal unit commitment with probabilistic reserve determination. *IEEE Trans Power Appar Syst* 1978;PAS-97(6):2154–66

Fogel L. J., A. J. Owens, and M. J. Walsh, "Artificial Intelligence through Simulated Evolution", New York: John Wiley & Sons, Inc., 1966

Frangioni A., C. Gentile, and F. Lacalandra, "Tighter approximated MILP formulations for unit commitment problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 105–113, Feb. 2009

Fred Glover (1986). "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence". *Computers and Operations Research.* 13 (5): 533–549

Hara K., Kimura M., and Honda N., "A method for planning economic unit commitment and maintenance of thermal power systems," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-85, pp. 427–436, May 1966

Holland J. H., *Adaptation in Natural and Artificial System*, 2nd ed., Cambridge, MA: MIT Press. 1992

International Energy Agency , *Electricity Information 2018, Statistics, Overview*

International Energy Agency , *Energy Policies of IEA Countries, Greece 2017 Review*

Juste K. A., H. Kita, E. Tanaka, and J. Hasegawa, "An Evolutionary Programming Solution to the Unit Commitment Problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 4, November 1999

Kazarlis S., Bakirtzis A, Petridis V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(1): 83–92

Kerr R. H., Scheidt J. L., Fontana A. J., and Wiley J. K., "Unit commitment," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-85, pp. 417–421, May 1966

Lau T. W., C. Y. Chung, K. P. Wong, T. S. Chung, and S. L. Ho, "Quantum-inspired evolutionary algorithm approach for unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1503–1512, Aug 2009

Lauer G. S., Sandell Jr. N. R., Bertsekas N. R., and Posbergh T. A., "Solution Of large scale optimal unit commitment problems," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 79–96, Jan. 1982

Lee F. N., "Short-term unit commitment—a new method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, pp. 421–428, May 1988

Lee F. N., Huang J., and Adapa R., "Multi-area unit commitment via sequential method and a dc power flow network model," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, pp. 279–287, Feb. 1994

- Li C., R. B. Johnson, and A. J. Svoboda, "A new unit commitment method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 113–119, Feb. 1997
- Mallipedi, R., P. N. Suganthan, "Unit commitment - A survey and comparison of conventional and nature inspired algorithms", *International Journal of Bio-Inspired Computation*, (2014)
- Mantawy A.H., Y.L. Abdel-Magid, S.Z. Selim, "A simulated annealing algorithm for unit commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, pp. 197–204, Feb. 1998
- MathWorks, 2018, *Mixed-Integer Linear Programming Algorithms*, viewed 25 August 2018 <<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html>>
- MathWorks, 2018, *Problem-Based Optimization*, viewed 25 August 2018 < <https://www.mathworks.com/help/optim/problem-based-lp-milp.html> >
- MathWorks, 2018, *Problem-Based Workflow*, viewed 25 August 2018 < <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/problem-based-workflow.html> >
- Merlin A. and Sandrin P., "A new method for unit commitment at Electricite De France," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, pp. 1218–1225, Aug. 1983
- Mészáros C., and Suhl, U. H. Advanced preprocessing techniques for linear and quadratic programming. *OR Spectrum*, 25(4), pp. 575–595, 2003
- Mokhtari S., J. Singh, and B. Wollenberg, "A unit commitment expert system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, pp. 272–277, Feb. 1988
- Morales-Espana G, Latorre JM, Ramos A "Tight and compact MILP formulation for the thermal unit commitment problem" *IEEE Trans Power Syst* 28(4):4897–4908, (2013)
- Nemhauser, G. L. and Wolsey, L. A. *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley-Interscience, New York, 1999
- Nowak M. P. and W. Römisich, "Stochastic Lagrangian relaxation applied to power scheduling in a hydro-thermal system under uncertainty," *Ann. Oper. Res.*, vol. 100, pp. 251–272, 2000
- Ouyang, et al ., "Short-term unit commitment expert system," *Elect. Power Syst. Res.*, pp. 1–13, Dec. 1990
- Padhy N. P., "Unit commitment—A bibliographical survey," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1196–1205, May 2004
- Patra S., S. Goswami, B. Goswami, Fuzzy and simulated annealing based dynamic programming for the unit commitment problem, *Expert Systems with Applications* 36 (3) (2009) 5081-5086
- Saravanan, B., S. Das, et al. (2013). "A solution to the unit commitment problem—a review." *Frontiers in Energy* 7(2): 223-236
- Savelsbergh, M. W. P. *Preprocessing and Probing Techniques for Mixed Integer Programming Problems*. *ORSA J. Computing*, Vol. 6, No. 4, pp. 445–454, 1994

Shoults R. R., Chang S. K., Helmick S., and Grady W. M., "A practical approach to unit commitment, economic dispatch and savings allocation for multiple-area pool operation with import/export constraints," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-99, pp. 625–635, Mar./Apr. 1980

Simopoulos D. N., S. D. Kavatza, and C. D. Vournas, "Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 1, pp. 68–76, Feb 2006

Sisworahardjo N. S. and A. A. El-Kaib, "Unit commitment using ant colony search algorithm," in Proc. 2002 Large Eng. Syst. Conf. Power Eng., 2002, pp. 2–6

Sood Y. R., N. P. Padhy, and H. O. Gupta, "Discussion on optimal power flow by enhanced genetic algorithms," IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, p. 1219, Aug. 2003

Tsalavoutis, V., Vrionis, C., & Tolis, A. (2016). An enhanced real coded approach for the optimization of the Unit Commitment Problem. 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), 1-8

Tong, S.K., Shahidehpour, S.M. and Ouyang, Z. (1991) 'A heuristic short-term unit commitment', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp.1210–1216
Viana A., J. P. Pedroso, "A new MILP-based approach for unit commitment in power production planning", Electrical Power and Energy Systems 44 (2013) 997–1005

Valenzuela J. and A. E. Smith, "A seeded memetic algorithm for large unit commitment problems," Journal of Heuristics, vol. 8, no. 2, pp. 173–195, 2002

Wolsey, L. A. Integer Programming. Wiley-Interscience, New York, 1998

Wong K. P. and Wong Y.W., "Short term hydro thermal scheduling part I: simulated annealing approach," Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist., vol. 141, pp. 497–501, 1994

Wu L. "A tighter piecewise linear approximation of quadratic cost curves for unit commitment problems" IEEE Trans Power Syst 2011; 26(4):2581–3

Xie, Y-G. and Chiang, H-D. (2010) 'A novel solution methodology for solving large-scale thermal unit commitment problem',. Electric Power Components and Systems, Vol. 38, No. 14, pp.1615–1634

Yamin H.Y., 'Review on methods of generation scheduling in electric power systems', Electric Power Systems Research 69 (2004); 227–248

Yu D. R., Wang Y Q, Guo R. A Hybrid Ant Colony Optimisation Algorithm based lambda iteration method for unit commitment. In: Proceedings of IEEE Second WRI Global Congress on Intelligence Systems. Wuhan, China, 2010, 19–22

Yuan X., B. Ji, S. Zhang, H. Tian, and Y. Hou, "A new approach for unit commitment problem via binary gravitational search algorithm," Applied Soft Computing, vol. 22, pp. 249–260, 2014

X. Yuan, H. Nie, A. Su, L. Wang, and Y. Yuan, "An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem," Expert Systems with Applications, vol. 36, no. 4, pp. 8049 – 8055, 2009

Yuan X., A. Su, H. Nie, Y. Yuan, and L. Wang, "Unit commitment problem using enhanced particle swarm optimization algorithm," *Soft Computing*, vol. 15, no. 1, pp. 139–148, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00500-010-0541-y>

Zhang X. H., Zhao J Q, Chen X Y. A hybrid method of lagrangian relaxation and genetic algorithm for solving UC problem. In: *Proceedings of International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. Nanjing, China, 2009, 1–6

Zheng H., J. Jian, L. Yang, R. Quan, A deterministic method for the unit commitment problem in power systems, *Computers & Operations Research* 66 (2016) 241-247

Εισαγωγή στην Επιχειρησιακή Έρευνα, Hamdy A. Taha