

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ  
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΕ ΤΟΜΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ, ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ  
ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»**

**Γεώργιος Σεμερτζίδης**

Επιβλέπων Καθηγητής: Αθανάσιος Τόλης

## Ευχαριστήριο Σημείωμα

Αρχικά, θέλω να εκφράσω την τεράστια εκτίμηση μου προς τον υποψήφιο διδάκτορα Τσαλαβούτη Βασίλειο, η συνεισφορά του οποίου στην παρούσα διπλωματική υπήρξε καθοριστική. Με τη συνεχή καθοδήγηση και βοήθεια του καταφέραμε να φέρουμε σημαντικά αποτελέσματα στη παρούσα εργασία και να συμβάλουμε και εμείς με το έργο μας στην ενεργειακή κοινότητα. Εν συνέχεια, επιθυμώ να υπογραμμίσω τον σεβασμό μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Τόλη Αθανάσιο, μέσω του οποίου αποφάνθηκα για το αντικείμενο που θα ήθελα να ακολουθήσω στην μετέπειτα πορεία μου.

Δεν θα μπορούσα να αφήσω εκτός του παρόντος εδαφίου τους γονείς μου Σταματίνα και Χρηστό για την ατέρμονη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια στον εκπαιδευτικό μου βίο. Θα ήθελα να πω επίσης ένα μεγάλο 'Ευχαριστώ' στους συνάδελφους μου από τη σχολή αλλά και τους κολλητούς μου φίλους που ήταν δίπλα μου αυτά τα πέντε χρονιά ταξιδιού για εξερεύνηση γνώσεων όπως και σε κάθε εύκολη και δύσκολη στιγμή της ζωής μου.

Τέλος, η διαδρομή μου τα τελευταία 5 χρόνια, μέσω της συναναστροφής και επικοινωνίας με τους ακαδημαϊκούς του ιδρύματός μας, με όπλισε με τα απαραίτητα εφόδια προκειμένου σε ένα δυνατό ξεκίνημα ως Διπλωματούχος Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστήμων ΕΜΠ.

Γεώργιος Σεμερτζίδης

Φεβρουάριος 2020

## Έποψη

Ζητούμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η προσαρμογή και η εφαρμογή ενός εξελικτικού αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος δέσμευσης μονάδων στο οποίο λαμβάνονται υπόψη συμβατικές μονάδες, ηλεκτρικά οχήματα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Unit Commitment Problem & Electric Vehicles – UCP&EVs). Η παράμετρος της διαθεσιμότητας και φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων εισάγεται με τελικό στόχο την εκτίμηση της ελάχιστης δυνατής τιμής κόστους παραγωγής και του προγράμματος παραγωγής ενέργειας των μονάδων για ένα 24ωρο.

Το πρόβλημα δέσμευσης μονάδων επιλύθηκε με βάση τον εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης ERC – FROFI και κάποιες προσθήκες ώστε να ενταχθούν στο σύστημα και τα ηλεκτρικά οχήματα. Ο αλγόριθμος συνδυάζει τον εξελικτικό αλγόριθμο FROFI και έναν ευρετικό μηχανισμό, ο οποίος επιδιορθώνει τις υποψήφιες λύσεις του προβλήματος.

Για την προσαρμογή του Εξελικτικού Αλγορίθμου στο πρόβλημα που περιλαμβάνει τα ηλεκτρικά οχήματα, αναπτύχθηκε ευρετικός μηχανισμός επιδιόρθωσης των σχετικών περιορισμών. Η ελάχιστη δυνατή τιμή κόστους όπως και το πρόγραμμα παραγωγής για ένα 24ωρο υπολογίζεται με χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου που περιλαμβάνει τον προαναφερθέν μηχανισμό επιδιόρθωσης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την περίπτωση που ο μηχανισμός αυτός παραλείπεται. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ελάχιστη τιμή κόστους και το πρόγραμμα παραγωγής για διαφορά ποσοστά διείσδυσης οχημάτων στο σύστημα. Επίσης, επισυνάπτονται οι διαφορές αναμεσα σε δυο περιπτώσεις δυνατότητας φόρτισης οχημάτων: 1) Perfect Infrastructure (χωρίς περιορισμό χρόνου φόρτισης) 2) Modest Infrastructure (συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που επιτρέπεται φόρτιση). Τέλος, επισημαίνεται η διαφορά τους κόστους και προγράμματος παραγωγής ενέργειας στη περίπτωση όπου συμβάλλουν και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην κάλυψη ζήτησης.

Τα αποτελέσματα που έχουμε από τον αλγόριθμο της παρούσας εργασίας φανερώνουν την αποδοτικότητα την προτεινόμενης μεθόδου, καθώς βρίσκουμε χαμηλότερη ελάχιστη τιμή κόστους σε σχέση με την περίπτωση που ο προτεινόμενος μηχανισμός επιδιόρθωσης παραλείπεται, ενώ ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί. Επιπλέον ο προτεινόμενος εξελικτικός αλγόριθμος παρουσιάζει σημαντική στιβαρότητα (robustness) καθώς επιτυγχάνει να παρουσιάσει εφικτή λύση σε κάθε του τρέξιμο ενώ η διαφορά μεταξύ της καλύτερης και της χειρότερης τιμής κόστους που επιτυγχάνει είναι μικρή. Με την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων παρατηρείται η αύξηση της ζήτησης ισχύος, η αύξηση κόστους παραγωγής επομένως και αλλαγές στο πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας σε σχέση με την περίπτωση χωρίς ηλεκτρικά οχήματα. Όμως ο προτεινόμενος αλγόριθμος καταφέρνει να δώσει με επιτυχία πάντα ελάχιστη δυνατή λύση για κάθε ανεξάρτητο 'τρέξιμο'. Τέλος, η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιφέρει σοβαρές αλλαγές στο πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας των συμβατικών μονάδων όπως και σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής σε σχέση με τη μέθοδο χωρίς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

## Διάρθρωση διπλωματικής

Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο του προβλήματος δέσμευσης των μονάδων και ηλεκτρικών οχημάτων που αποτελεί την κεντρικό θέμα της παρούσας εργασίας. Γίνεται αναφορά στον τρόπο επίλυσης του, τους περιορισμούς του και τις ντετερμινιστικές και στοχαστικές μεθόδους που έχουν εξελιχθεί όλα αυτά τα χρονιά για την επίλυση του βασικού προβλήματος δέσμευσης μονάδων. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά και στην επίδραση που η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να έχει στο σύστημα. Τέλος, αναπτύσσεται η έννοια της βελτιστοποίησης, η μέθοδος που επιλέξαμε για την επίλυση του προβλήματος δηλαδή ο αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης και το πρόγραμμα που κατασκευάστηκε με το όνομα 'ERC - FROFI&EVs'.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος, ορίζοντας πλήρως τις μεταβλητές, τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση του. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μαθηματική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εξετάζεται η επίδραση τους στο σύστημα ενέργειας αλλά και στην συνολική ζήτηση που καλούνται να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής.

Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της Matlab δηλαδή τον αλγόριθμο ERC - FROFI&EVs, που κατασκευάστηκε με σκοπό την βελτιστοποίηση του προβλήματος. Αναλύονται εκτενώς τα στάδια που απαρτίζουν την διαδικασία επίλυσης του ERC - FROFI&EVs και περιγράφεται η δημιουργία αυτού του μοντέλου με βάση το μαθηματικό υπόβαθρο του προηγούμενου κεφαλαίου. Το πρόβλημα δέσμευσης των μονάδων και ηλεκτρικών οχημάτων επιλύεται για τρία βασικά σενάρια, το πρώτο αφορά την επίλυση χωρίς μηχανισμό επιδιόρθωσης των περιορισμών για τα οχήματα, το δεύτερο αφορά την επίλυση με μηχανισμό επιδιόρθωσης των περιορισμών για τα οχήματα και το τελευταίο με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών στο σύστημα. Η ανάπτυξη της λογικής του προγράμματος έγινε με βάση διεθνή βιβλιογραφία, όμως ο προτεινόμενος αλγόριθμος με τον μηχανισμό επιδιόρθωσης της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται ως νέα μέθοδο επίλυσης.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα για όλα τα σενάρια που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σε κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκαν 20 ανεξάρτητα τρεξίματα του αλγορίθμου. Αρχικά, εκτελείται ο αλγόριθμος χωρίς τον μηχανισμό επιδιόρθωσης για διάφορες τιμές χαλάρωσης του περιορισμού πλήρους φόρτισης των οχημάτων την ώρα εκκίνησης των ταξιδιών τους και στη συνέχεια ο αλγόριθμος με τον μηχανισμό επιδιόρθωσης και συγκρίνονται τα αποτελέσματα. Έπειτα, εξετάζεται η επίδοση του αλγορίθμου με χρήση του μηχανισμού επιδιόρθωσης στην περίπτωση όπου κάνουμε υπόθεση Perfect infrastructure (χωρίς περιορισμό χρόνου φόρτισης) και Modest Infrastructure (συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που επιτρέπεται φόρτιση). Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία έχουμε διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα και αναλύεται η επίδρασή τους. Για κάθε σενάριο, απεικονίζεται το πρόγραμμα των μονάδων, η ισχύς που καλούνται να παράξουν κάθε ώρα όπως και η ισχύς που φορτίζονται τα ηλεκτρικά οχήματα κάθε κατηγορίας για κάθε ώρα. Επίσης υπολογίζεται η ελάχιστη και μέση τιμή κόστους παραγωγής, η τυπική απόκλιση των διάφορων τιμών κόστους και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του κάθε ανεξάρτητου 'τρεξίματος'.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται τα γενικά συμπεράσματα της μελέτης, εμβαθύνοντας στη σημασία του προτεινομένου πρωτοποριακού αλγορίθμου επίλυσης του προβλήματος δέσμευσης των μονάδων και ηλεκτρικών οχημάτων, στον σχολιασμό των αποτελεσμάτων και στο προτεινόμενο υπολογιστικό μοντέλο.

Στο έκτο κεφάλαιο υπάρχει ο επίλογος της εργασίας με μια μικρή σύνοψη των σημαντικότερων σημείων που αναπτυχθήκαν.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b>	<b>11</b>
1.1	Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων (UCP & EVs)	11
1.1.1	Εισαγωγή στο Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων	11
1.1.2	Επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων	12
1.1.3	Περιορισμοί του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων	13
1.1.4	Μέθοδοι Επίλυσης του απλού Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων	15
1.1.4.1	Ντετερμινιστικές Μέθοδοι	15
1.1.4.2	Στοχαστικές Μέθοδοι – Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	18
1.1.4.3	Υβριδικοί Αλγόριθμοι (Hybrid Algorithms)	20
1.1.5	Επίλυση Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων	22
1.1.6	Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων	25
1.2	Βελτιστοποίηση	26
1.2.1	Βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς	26
1.2.2	Τεχνικές διαχείρισης περιορισμών	27
1.3	Αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης (DE)	28
1.3.1	Εισαγωγή	28
1.3.2	Περιγραφή Αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης (DE)	28
1.3.2.1	Αρχικοποίηση του πληθυσμού της DE	29
1.3.2.2	Μετάλλαξη (Mutation) και διαφορά διανυσμάτων	30
1.3.2.3	Διασταύρωση (Crossover)	31
1.3.2.4	Επιλογή (Selection)	32
1.3.2.5	Παράμετροι ελέγχου της DE	33
1.4	Κανόνας Εφικτότητας – Feasibility Rule	33
1.5	FROFI	34
1.5.1	Μηχανισμοί του αλγορίθμου FROFI	34
1.5.2	DE διαδικασίες στον FROFI	35
1.5.3	Μηχανισμός αντικατάστασης	36
1.5.4	Στρατηγική μετάλλαξης	36
1.6	ERC FROFI για το ΠΔΕ+ΗΟ	36

<b>2</b>	<b>Μαθηματικό Μοντέλο .....</b>	<b>37</b>
2.1	Εισαγωγή.....	37
2.2	Συμβολισμός Βασικών Μεγεθών .....	38
2.3	Μαθηματική Μοντελοποίηση Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων .....	40
2.3.1	Αντικειμενική Συνάρτηση .....	40
2.3.2	Περιορισμοί Προβλήματος.....	42
2.3.2.1	Περιορισμός ισοζυγίου ισχύος.....	42
2.3.2.2	Περιορισμός απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας.....	42
2.3.2.3	Περιορισμός ορίων παραγωγής κάθε μονάδας (ramp rates) .....	43
2.3.2.4	Περιορισμός ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδων ..	43
2.3.2.5	Περιορισμοί κατάστασης φόρτισης μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων	44
2.4	Μαθηματική Μοντελοποίηση Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	45
<b>3</b>	<b>Υπολογιστικό Μοντέλο .....</b>	<b>47</b>
3.1	Εισαγωγή.....	47
3.2	Εισαγωγή δεδομένων συστήματος.....	48
3.2.1	Ανάλυση και Εισαγωγή Δεδομένων για Ηλεκτρικά οχήματα.....	50
3.3	Περιγραφή του προτεινομένου υπολογιστικού προγράμματος.....	60
3.3.1	Δομή των διανυσματικών παραμέτρων.....	60
3.3.2	Περιγραφή των Μηχανισμών Επιδιόρθωσης .....	61
3.3.2.1	Επιδιόρθωση Μηχανισμού Στρεφόμενης Εφεδρείας.....	62
3.3.2.2	Επιδιόρθωση περιορισμού ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδων	63
3.3.2.3	Αποδέσμευση μονάδων με πλεονάζουσα παραγωγή ενέργειας...	64
3.3.2.4	Επιδιόρθωση ανάληψης/απόρριψης φορτίου μονάδων (Ramp Rates)	65
3.3.2.5	Επιδιόρθωση ισοζυγίου ισχύος.....	66
3.3.3	Επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για τα Ηλεκτρικά Οχήματα ( Without Repair Mechanism for EVs ).....	68
3.3.4	Επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων και Μηχανισμού Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs ) .....	69
3.3.5	Επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Μηχανισμού Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs )	70

3.4	Αντικειμενική συνάρτηση και διαδικασίες ERC – FROFI.....	71
3.5	Κριτήριο τερματισμού – Λοιπές διαδικασίες αλγορίθμου .....	71
<b>4</b>	<b>Αποτελέσματα.....</b>	<b>72</b>
4.1	Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Without Repair Mechanism for EVs )	72
4.1.1	Αποτελέσματα σε σύστημα 10 Μονάδων Παραγωγής .....	72
4.1.1.1	Περίπτωση για διαφορετικές τιμές χαλάρωσης στον περιορισμό ισότητας πλήρους φόρτισης των οχημάτων την ώρα 5 .....	72
4.2	Επίλυση με χρήση του μηχανισμού επιδιόρθωσης των περιορισμών για ηλεκτρικά οχήματα ( Repair Mechanism for EVs ) .....	74
4.2.1	Αποτελέσματα σε σύστημα 10 Μονάδων Παραγωγής .....	74
4.2.1.1	Αποτελέσματα επίλυσης Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs ).....	75
4.2.1.2	Συγκριτικά Αποτελέσματα με Πρόβλημα χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs ).....	77
4.2.1.3	Αποτελέσματα ανάλογα το ποσοστό Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων στο σύστημα .....	80
4.2.1.4	Πρόγραμμα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας χωρίς περιορισμό χρόνου στο 24ωρο – με περιορισμού χρόνου στο 24ωρο ( Perfect infrastructure – Modest infrastructure ).....	84
4.2.2	Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Μηχανισμού Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs ) .....	88
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>94</b>
5.1	Μέθοδος με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης – Χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης	94
5.2	Μέθοδος με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης και ποσοστά Διείσδυσης ΗΟ .....	94
5.3	Μέθοδος με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης: Perfect Infrastructure – Modest Infrastructure .....	95
5.4	Επίδραση Διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα.....	95
<b>6</b>	<b>Επίλογος .....</b>	<b>96</b>
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>97</b>



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Πίνακας Βασικών Μεγεθών .....	38
Πίνακας 3.1: Πίνακας αριθμητικών τιμών παραμέτρων συστήματος.....	49
Πίνακας 3.2: Προβλεπόμενη ζήτηση φορτίου .....	50
Πίνακας 3.3: Παράμετροι ΗΟ για την εργασία.....	50
Πίνακας 3.4: Επίπεδα διείσδυσης ΗΟ (σε %) με τον αντίστοιχο αριθμό ΗΟ που χρησιμοποιείται στο μοντέλο, για 1,66 εκατομμύρια άτομα και 0,45 οχήματα / κάτοικο. ....	53
Πίνακας 3.5: Μέση ταχύτητα οχημάτων ανάλογα το τύπο ταξιδιού και την απόσταση .....	53
Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικών Οχημάτων για 100% διείσδυση.....	56
Πίνακας 4.4: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (MW).....	76
Πίνακας 4.5: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (100% Διείσδυση) (MW).....	83
Πίνακας 4.6: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (0% Διείσδυση) (MW).....	83
Πίνακας 4.7: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (Perfect Infrastructure) (MW) .....	87
Πίνακας 4.8: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (Modest Infrastructure) (MW).....	88
Πίνακας 4.9: Πρόγραμμα παραγωγής συστήματος 10 μονάδων για FD=0.....	91
Πίνακας 4.10: Πρόγραμμα παραγωγής συστήματος 10 μονάδων για FD=0.5 .....	92
Πίνακας 4.11: Πρόγραμμα παραγωγής συστήματος 10 μονάδων για FD=1 .....	92
Πίνακας 4.12: Πρόγραμμα παραγωγής συστήματος 10 μονάδων για FD=1.5 .....	93

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Βασικά στάδια του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010).....	29
Σχήμα 1.2: Απλό σχήμα μετάλλαξης DE της εξ (1.4) (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010).....	31
Σχήμα 1.3: Πιθανά διανύσματα απογόνων (trial v.) από διωνυμική διασταύρωση σε χώρο 2D (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010).....	32
Σχήμα 2.1: Συμβατικό μοντέλο συστήματος παραγωγής ενέργειας.....	40
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής υπολογιστικής συλλογιστικής πορείας.....	48
Σχήμα 3.2: Ώρα εκκίνησης διαφορετικών τύπου ταξιδιών σε περίοδο 24 ωρών (Madzharov D. et al., 2014).....	51
Σχήμα 3.3: Ο χρόνος έναρξης των μονόδρομων και αμφίδρομων ταξιδιών σε περίοδο 24 ωρών (η καμπύλη αμφίδρομων ταξιδιών είναι το άθροισμα των τριών πρώτων προφίλ του σχήματος 3.2) (Madzharov D. et al., 2014).....	52
Σχήμα 3.4: Κατανομή των αποστάσεων των ταξιδιών (Transport).....	52
Σχήμα 4.1: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων.....	76
Σχήμα 4.2: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων για τιμή χαλάρωσης 0,5 MW.....	78
Σχήμα 4.3: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων για τιμή χαλάρωσης 0,2 MW.....	79
<i>Σχήμα 4.1: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων.....</i>	<i>79</i>
Σχήμα 4.4: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων για κάθε ποσοστό διεύθυνσης οχημάτων.....	82
Σχήμα 4.5: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων (Perfect Infrastructure).....	86
Σχήμα 4.6: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων (Modest Infrastructure).....	87
Σχήμα 4.7: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων για κάθε τιμή συντελεστή FD διεύθυνσης ΑΠΕ.....	91

# 1 Εισαγωγή και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

## 1.1 Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων (UCP & EVs)

### 1.1.1 Εισαγωγή στο Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Είναι γνωστό ότι οι δραστηριότητες των ανθρώπων στην καθημερινότητα τους χαρακτηρίζονται από συχνώς επαναλαμβανόμενες ενέργειες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ένα σημαντικό πλήθος συστημάτων που παρέχουν υπηρεσίες σε μεγάλο μέρος του παγκοσμίου πληθυσμού, να ακολουθούν πιστά την επαναληπτική αυτή διαδικασία ανάλογα την δραστηριότητα που αναφέρονται (όπως για παράδειγμα συστήματα μεταφοράς, συστήματα επικοινωνίας, καθώς και συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας). Στο τομέα των μεταφορών όμως λόγω της ανάγκης μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, των τοπικών προβλημάτων ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μεγάλους οικισμούς και την αυξανόμενη ζήτηση για πετρέλαιο, οι κυβερνήσεις των κρατών προσπαθούν να αλλάξουν 'σελίδα' από την τυπική μετακίνηση με οχήματα που καταναλώνουν βενζίνη, πετρέλαιο και υγραέριο σε μια νέα εποχή που οι μετακινήσεις μας καθημερινώς θα πραγματοποιούνται με εξολοκλήρου ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles). Στην Ευρώπη, έχουν ήδη μπει τα πρώτα θεμέλια με σκοπό την απανθρακοποίηση της καθημερινότητας μέχρι το 2050. Το ίδιο συμβαίνει και σε περιοχές όπως η Κίνα, όπου έχουν τεθεί στόχοι όπως η αγορά 150.000 υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων μόνο στο Πεκίνο και 150.000.000 σε ολόκληρη την κινεζική περιοχή. Κατά συνέπεια, αυτό θα επηρεάσει και σύστημα παραγωγής ενέργειας αφού είναι προφανές ότι θα υπάρξουν αλλαγές στη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. (Madzharov D. et al., 2014) Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι πιο υψηλό τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες (για παράδειγμα από τις 9.00 μέχρι τις 15.00) και τις απογευματινές και βραδινές ώρες (για παράδειγμα από τις 19.00 μέχρι και τις 22.00), λόγω αυξημένης ζήτησης βιομηχανικών, οικιακών, μεταφορικών και εμπορικών αναγκών. Αντιθέτως, τις υπόλοιπες ώρες μέσα στη μέρα όπου οι βιομηχανίες σταματούν να λειτουργούν, οι εργαζόμενοι επιστρέφουν στην οικία τους και οι άνθρωποι απολαμβάνουν τον βραδινό τους ύπνο το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι χαμηλότερο. Επομένως, εδώ εμφανίζεται το Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων (Unit Commitment Problem, ΠΔΜ) στο σύστημα με σκοπό τον καθορισμό του προγράμματος λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε περίοδο (συνήθως για μια ημέρα, δηλαδή για μια περίοδο 24 ωρών) ώστε να καλύπτεται κάθε ώρα η ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Για την λειτουργία κάποιων μονάδων παραγωγής απαιτείται η εκκίνηση της, ο συγχρονισμός της ανάλογα τις προδιαγραφές του κάθε συστήματος που εξετάζεται και η σύνδεση της με σκοπό να καλύψει και να μεταδώσει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη και τα ηλεκτρικά οχήματα στη μοντελοποίηση του προβλήματος τότε το πρόβλημα ονομάζεται Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων. Το πρόβλημα αυτό έχει σκοπό την καλύτερη δυνατή οικονομία αλλά και τη βελτιστοποίηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή την δημιουργία του ιδανικότερου χρονοδιαγράμματος παραγωγής με σκοπό την κάλυψη της ήδη υπάρχουσας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και της ποσότητας ενέργειας

που πρέπει να μεταφερθεί στα ηλεκτρικά οχήματα κάθε ώρα μέσα στη μέρα με το ελάχιστο δυνατό κόστος. (Wood Allen J., et al., 2013) (Madzharov D. et al., 2014)

### 1.1.2 Επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Το Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που έχει προκύψει για τη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εντάσσεται στην επιστήμη της Επιχειρησιακής Έρευνας. Εμείς εξετάζουμε το πρόβλημα αυτό από την πλευρά της οργάνωσης, σωστής λειτουργίας και εκτέλεσης. Αρχικό μας μέλημα είναι η πρόβλεψη της απαιτούμενης ενέργειας που χρειάζεται ο καταναλωτής για την εξυπηρέτηση των αναγκών, συνήθως μέσα σε ένα 24ωρο. Έπειτα, σκοπός μας είναι η κάλυψη αυτής της ζήτησης ενέργειας με το βέλτιστο προγραμματισμό των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας που βρίσκονται στην διάθεση μας, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα και τα λειτουργικά κόστη. Στα λειτουργικά κόστη συμπεριλαμβάνονται τα κόστη λόγω εκκίνησης/κλεισίματος (cold/ hot start up cost) της κάθε μονάδας καθώς και παραγωγής ενέργειας μέσω του αντίστοιχου καυσίμου. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την καύση ορυκτών καυσίμων λ.χ. λιγνίτη, υδρογονανθράκων, πετρελαίου, φυσικού αερίου αλλά και ανανεώσιμων πηγών. Στην παρούσα εργασία, εστιάζουμε στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν θερμικές/συμβατές μονάδες, δηλαδή αυτές που καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα, αλλά και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (πχ. ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρικά, πάνελ). Η ένταξη μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε μια οικονομία αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς (constrained optimization), οι οποίοι αφορούν θερμικά – λειτουργικά όρια των μονάδων του συστήματος είτε όρια οικονομικής σημασίας. (Πλατανιώτης Δ.-Α., 2018) (Σπανός Α., 2019)

Το ΠΔΜ&ΗΟ πρόκειται για ένα πρόβλημα που στη συγκεκριμένη εργασία λύνεται με χρήση του αλγορίθμου ERC-FROFI. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον αλγόριθμο Διαφορικής Εξέλιξης που χρησιμοποιεί Πραγματική Κωδικοποίηση. Ειδικότερα το ΠΔΜ&ΗΟ χωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα (Maturana J. and Riff M.-C., 2007):

- Το πρώτο μέρος αναφέρεται, για το ζητούμενο χρονικό διάστημα, σε ένα πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας με ενδείξεις μηδέν (0) και ένα (1) όπου προσδιορίζεται για κάθε ώρα του διαστήματος αν μια μονάδα δεν λειτουργεί ή λειτουργεί αντίστοιχα.
- Το δεύτερο μέρος, που ονομάζεται Πρόβλημα Κατανομής Φορτίου (ΠΚΦ) (Economic Load Dispatch), καθορίζει για κάθε ώρα τα ακριβή ποσά ισχύος που προσφέρει κάθε μονάδα στο σύστημα με σκοπό τη μείωση του συνολικού κόστους αλλά και ταυτόχρονη εξυπηρέτηση του ζητούμενου φορτίου. (Saramourtsis A. et al.)

Το ΠΚΦ είναι ένα ξεχωριστό πρόβλημα το οποίο είναι απαραίτητο να επιλυθεί μαζί με το ΠΔΜ&ΗΟ με στόχο την ελάχιστη δυνατή τιμή του συνολικού κόστους. Η κύρια διαφορά που παρουσιάζουν αυτά τα δυο προβλήματα είναι πως το ΠΚΦ υποθέτει ένα συγκεκριμένο πλήθος ήδη δεσμευμένων μονάδων παραγωγής όπου καθορίζεται η παραγομένη ενέργεια από κάθε μονάδα για κάθε χρονική στιγμή. Αντίθετα, στο ΠΔΜ&ΗΟ γίνεται ο προσδιορισμός για το ποιες μονάδες θα χρησιμοποιηθούν και τι

ποσό ενέργειας θα παράγουν. Άρα, ο αλγόριθμος επίλυσης που χρησιμοποιούμε εξετάζει διάφορα σενάρια προγράμματος παραγωγής ενέργειας με στόχο να βρεθεί το βέλτιστο δυνατό. (Σπανός Α., 2019)

### 1.1.3 Περιορισμοί του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η σωστή διατύπωση των περιορισμών σε ένα πρόβλημα Επιχειρησιακής Έρευνας αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα μέρη της μοντελοποίησης του καθώς αποτελούν το στοιχείο που κατευθύνει το πρόβλημα στην επιθυμητή λύση με όσο το δυνατόν βέλτιστο τρόπο. Στην περίπτωση του ΠΔΜ&ΗΟ υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί που αφορούν την σωστή λειτουργία των μονάδων σύμφωνα με τις προδιαγραφές λειτουργίας τους, την χρησιμοποίηση των καταλληλότερων μονάδων για την κάλυψη της ζήτησης για κάθε χρονική στιγμή αλλά και της αξιοπιστίας του συστήματος. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιοι βασικοί περιορισμοί όπου είναι κοινοί για τα περισσότερα προβλήματα αλλά και οι περιορισμοί που τα ηλεκτρικά οχήματα. (Wodd A. et al.)

- Ισορροπία Ισχύος Συστήματος (System power balance)

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να ικανοποιείται κάθε ώρα του ορίζοντα προγραμματισμού.

- Στρεφομένη Εφεδρεία (Spinning Reserve)

Με τον όρο Στρεφομένη Εφεδρεία περιγράφεται η ισχύς που είναι δεσμευμένη αλλά δεν παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία πρέπει να είναι επαρκής, προκειμένου να αντιμετωπιστεί μια πιθανή διακοπή μιας μονάδας χωρίς σημαντική πτώση της συχνότητας του συστήματος. Συνήθως ορίζεται ως ποσοστό της προβλεπόμενης μέγιστης τιμής του ζητούμενου φορτίου για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Σε κάποια συστήματα υπάρχει πρόβλεψη ώστε σε περίπτωση αστοχίας να υπάρχουν διαθέσιμες μονάδες άμεσης απόκρισης με σκοπό την αύξηση της αξιοπιστίας.

- Θερμικοί Περιορισμοί (Thermal Constraints)

- Ελάχιστη Παραγόμενη Ισχύς (Minimum Power Generation)

Κάθε μονάδα παραγωγής χαρακτηρίζεται από ένα ελάχιστο ποσό ισχύος που μπορεί να παράγει κάθε χρονική στιγμή.

- Μέγιστη Παραγόμενη Ισχύς (Maximum Power Generation)

Κάθε μονάδα παραγωγής χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο ποσό ισχύος που μπορεί να παράγει κάθε χρονική στιγμή. Οι δυο παραπάνω περιορισμοί προσδιορίζουν τα όρια παραγωγής ισχύος. (Power Generation Limits)

- Ελάχιστος Χρόνος Λειτουργίας (Minimum uptime)

Ως Ελάχιστος Χρόνος Λειτουργίας ορίζεται το ελάχιστο πλήθος διαδοχικών ωρών που μια μονάδα παράγει ενέργεια και θα πρέπει να παραμείνει λειτουργική πριν να είναι σε θέση να αποσυνδεθεί από το σύστημα παραγωγής.

- Ελάχιστος Χρόνος Κράτησης (Minimum downtime)

Ως Ελάχιστος Χρόνος Κράτησης ορίζεται το ελάχιστο πλήθος διαδοχικών ωρών που αν μια μονάδα αποσυνδεθεί πρέπει να παραμείνει σε αυτή τη κατάσταση πριν να είναι σε θέση ένα επανασυνδεθεί στο σύστημα παραγωγής.

- Περιορισμοί Κλίσης (Ramp Rates)

Ως Περιορισμοί Κλίσης ορίζεται το ποσό ενέργειας που μπορεί να αλλάξει η παραγωγή ισχύος κάθε μονάδας με το πέρασμα μιας χρονικής περιόδου του συστήματος. Αντίστοιχα, ορίζεται και ο περιορισμός κλίσης σύνδεσης και αποσύνδεσης κάθε μονάδας (startup/shutdown ramp limit).

- Περιορισμός Κατάστασης Ισότητας Φόρτισης Μπαταρίας (State Of Charge,soc)

Στη συγκεκριμένη εργασία, τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πλήρως φορτισμένα (soc=Batteryfull), η κατανάλωση ενέργειας από τα οχήματα ξεκινάει στις 6.00 το πρωί και πρέπει μέχρι τις 5.00 το επόμενο πρωί τα οχήματα να είναι πάλι πλήρως φορτισμένα(soc=Batteryfull).

- Περιορισμός Κατάστασης Ανισότητας Φόρτισης Μπαταρίας

Η κατάσταση της μπαταρίας κάθε ώρα μαζί με την ενέργεια που τελικώς προσφέρεται στα οχήματα την επόμενη ώρα πολλαπλασιασμένη με την αποδοτικότητα της μπαταρίας, πρέπει να μην ξεπερνάει την κατάσταση της μπαταρίας σε πλήρης φόρτιση.

- Μέγιστη Δυνατή Ισχύς Προσφοράς Ενέργειας από Σύστημα σε Οχήματα (MaxTransfer)

Η ενέργεια που προσφέρεται στα οχήματα κάθε ώρα πρέπει να είναι πάντα μικρότερη ή ίση από τη μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να δώσει το σύστημα την συγκεκριμένη ώρα.

#### 1.1.4 Μέθοδοι Επίλυσης του απλού Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων

Το ΠΔΜ είναι από μόνο του ένα σημαντικό πρόβλημα που αφορά την βιομηχανική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για τον λόγο αυτό αποτέλεσε αντικείμενο συστηματικής επιστημονικής έρευνας. Υπάρχουν έρευνες που είτε προσεγγίζουν το θέμα μέσω πολύπλοκων, θεωρητικών μαθηματικών μεθόδων αλλά και με απλών μαθηματικών μοντέλων. Η αποδοτικότητα κάθε μεθόδου βασίζεται στο αποτέλεσμα που παρουσιάζει συναρτήσει του υπολογιστικού χρόνου και τον τρόπο διατύπωσης των απαιτούμενων περιορισμών.

Είναι εύλογο λοιπόν σε αυτή την υποενότητα να τονίσουμε τις βασικές μεθόδους επίλυσης του πρωταρχικού μας προβλήματος ΠΔΜ (UCP), όπου σύμφωνα με τον Padhy (Padhy N. P., 2004) διακρίνονται ως εξής:

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

##### 1.1.4.1 Ντετερμινιστικές Μέθοδοι

Ντετερμινιστικές ονομάζονται οι μαθηματικές μέθοδοι που χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο δεδομένων και λειτουργούν κάτω από μια καθορισμένη ακολουθία καταστάσεων, άρα με μια καθορισμένη είσοδο δεδομένων μπορεί να προσχεδιαστεί με ακρίβεια η έξοδος του συστήματος, αγνοώντας την επίδραση εξωτερικών παραγόντων. Συγκροτούν ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο επιστημονικό κλάδο μελέτης λόγω της εύκολης εφαρμογής τους από τις υπολογιστικές μηχανές που διαθέτουμε. Συγκεκριμένα, από τον ορισμό μιας μαθηματικής συνάρτησης εισόδου προκύπτει μια και μοναδική τιμή εξόδου, όπου είναι και το αποτέλεσμα του υπολογιστικού αλγορίθμου. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες βασικές ντετερμινιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων (UCP) :

➤ Exhaustive Enumeration (Εξαντλητική Απαρίθμηση)

Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί με στόχο τον υπολογισμό του κόστους για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των μονάδων παραγωγής και τελικά επιλέγεται ο συνδυασμός αυτός με το χαμηλότερο κόστος σαν βέλτιστη επιλογή. Οι Kerr (Kerr R. H. et al., 1966) και Hara (Hara K. et al., 1966) έκαναν χρήση της Εξαντλητικής Απαρίθμησης για την εταιρία Florida Power Corporation. Παρόλο όμως που η μέθοδος είναι ασύμφορη από άποψη υπολογιστικού χρόνου, κατάφερε να παράξει σωστή λύση, αλλά η μέθοδος αυτή δεν είναι κατάλληλη για προβλήματα μεγάλης κλίμακας.

➤ Λίστα Προτεραιότητας (Priority listing)

Η Λίστα Προτεραιότητας καθορίζει εξαρχής τις μονάδες παραγωγής που βρίσκονται σε λειτουργία επιλέγοντας αυτές με το χαμηλότερο κόστος. Οι μονάδες που έχουν ήδη επιλεγεί λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση. Ο Burns (Burns R. M. , 1975) και Lee (Lee F. N., 1988) χρησιμοποίησαν τη Λίστα Προτεραιότητας για την επίλυση του ΠΔΜ. Ο Shoults και συνεργάτες του (Shoults R. R. et al., 1980)

ανέπτυξαν μια πιο άμεση και υπολογιστικά αποδοτική προσέγγιση εισάγοντας στο μοντέλο περιορισμούς εισόδου και εξόδου. Η Εκτεταμένη Λίστα Προτεραιότητας (Extended Priority Listing) είναι μια διαφορετική έκδοση που αποτελείται από δυο μέρη:

- a. Παραβλέποντας τους λειτουργικούς περιορισμούς, υπολογίζονται κάποια αρχικά προγράμματα παραγωγής των μονάδων με τη λογική της λίστας προτεραιότητας
- b. Έπειτα, με τεχνικές εύρεσης το πρόγραμμα διαφοροποιείται ώστε να ικανοποιούνται και οι λειτουργικοί περιορισμοί

#### ➤ Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming)

Ο αλγόριθμος του Δυναμικού Προγραμματισμού ήταν η πρώτη χρονικά μέθοδος βελτιστοποίησης του ΠΔΜ. Η λογική που ακολουθεί είναι η εξής, το συνολικό κόστος παραγωγής έστω  $X$  megawatt (MW) φορτίου που παράγουν έστω  $N$  μονάδες να είναι το κατώτατο δυνατό. Αντίστοιχα, το φορτίο έστω  $Y$  MW που παράγει κάποια μονάδα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε και το κόστος παραγωγής του υπολειπομένου ( $X-Y$ ) MW φορτίου να είναι το κατώτατο δυνατό, κοκ. Παρουσιάζει μια ευκολία στην προσθήκη περιορισμών που αφορούν την παραγωγή ενέργειας συγκεκριμένες ώρες (Lee F. N. et al., 1994) αλλά δυσκολία σε προσθήκες που επηρεάζουν συγκεκριμένες μονάδες παραγωγής για ολόκληρη τη χρονική περίοδο (Arroyo J. M. and Conejo A. J., 2002).

#### ➤ Branch and Bound

Η μέθοδος Branch and Bound είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ο οποίος βασίζεται στην επανάληψη των παρακάτω βημάτων.

- a. Το διάστημα στο οποίο μας είναι γνωστό ότι υπάρχει η λύση (μέσω των περιορισμών και των μεταβλητών απόφασης) χωρίζεται σε υποσύνολα. Τα υποσύνολα όπου όλα τα στοιχεία εμφανίζουν κάποιο περιορισμό αποκλείονται.
- b. Υπολογίζεται ένα ανώτατο όριο για την πιθανή λύση επομένως και ένα κατώτατο όριο για κάθε υποσύνολο με σκοπό να επιτευχθεί η ζητούμενη σύγκλιση και η αντίστοιχη λύση. Εφόσον, θέλουμε η λύση να είναι απόλυτη τότε το ανώτατο και κατώτατο όριο πρέπει να ταυτίζονται, κάτι που σε μικρής κλίμακας προβλήματα μπορεί να επιτευχθεί όμως σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα ορίζεται ένα αποδεκτό σχετικό σφάλμα.

Το μειονέκτημα που εμφανίζει ο αλγόριθμος είναι ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος, όπου για την εύρεση της βέλτιστης λύσης μέσω διαδοχικής απόρριψης διάφορων συνόλων πιθανών λύσεων αλλά και ταυτόχρονα ο προσδιορισμός του εκάστοτε ανώτατου και κατωτάτου ορίου απαιτεί την αντιμετώπιση του χρονοβόρου προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου (Economic dispatch). Οι Lauer (Lauer G. S. et al., 1982) και Cohen (Cohen A. I. and Yoshimura M., 1983) και οι συνεργάτες τους παρουσίασαν την μέθοδο αυτή ενσωματώνοντας χρονικά εξαρτώμενους



περιορισμούς χωρίς όμως την ανάγκη εξαρχής επιλογής των μονάδων που θα βρίσκονται σε λειτουργία.

➤ Λαγκραντζιανή Χαλάρωση (Lagrangian Relaxation)

Η μέθοδος της Λαγκραντζιανής Χαλάρωσης επιλύει το ΠΔΜ ως μια συνάρτηση του κόστους που προκύπτει από το άθροισμα του επιμέρους κόστους με τους αντίστοιχους περιορισμούς κάθε μονάδας. Χαρακτηρίζεται ως μια πιο σύγχρονη μέθοδο σε σχέση με τον δυναμικό προγραμματισμό και είναι ιδιαίτερα αποδοτική ως προς την εύρεση λύσης όσο αυξάνονται οι μονάδες παραγωγής καθώς μηδενίζεται η πιθανότητα εύρεσης μη βέλτιστης λύσης (suboptimality). Εμφανίζει μεγαλύτερη ευκολία στην οποιαδήποτε τροποποίηση του μοντέλου ώστε να μοντελοποιηθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και επιμέρους στοιχεία για κάθε μονάδα. Με την μέθοδο αυτή πρώτο εργάστηκε ο Merlin (Merlin A. and Sandrin P., 1983) που την κατοχύρωσε στο Electricite De France και ακολουθήσε ο Aoki και οι συνεργάτες του (Aoki K. et al., 1989) που την εφάρμοσε σε πρόβλημα μεγάλης κλίμακας.

➤ Μεικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)

Η προσέγγιση του Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού τα τελευταία χρονιά αποτελεί μια αρκετά διαδεδομένη λύση η οποία κατέστη συμφέρουσα με την ραγδαία άνοδο της υπολογιστικής δύναμης των συστημάτων αλλά και την ανάπτυξη αποδοτικών επιλυτών. Ο MILP αποτελεί υποκατηγορία του Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming, ΓΠ), και ενσωματώνει αρκετά από τα πλεονεκτήματα του. Προφανώς 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. Το κυριότερο πλεονέκτημα της είναι ο προσδιορισμός της σύγκλισης που επιτυγχάνεται σε σχέση με την βέλτιστη λύση σε ένα πεπραγμένο πλήθος βημάτων παρέχοντας ένα ευέλικτο και ακριβές πλαίσιο μοντελοποίησης (Σπανός Α., 2019). Η μέθοδος αυτή είναι από τις πιο διαδεδομένες στο χώρο που ασχολείται με την επίλυση του ΠΔΜ, οπότε υπάρχουν και αρκετές ερευνητικές ομάδες και εργασίες που ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη και την εξέλιξη του μέχρι σήμερα. Για παράδειγμα η πρώτη προσέγγιση έγινε από τον T. Dillon και τους συνεργάτες του το 1978 (Dillon T. S. et al., 1978), έπειτα, από τους Arroyo και Conejo (Arroyo J. M. and Conejo A. J., 2000) και M. Nowak και W. Romisch (Nowak M. P. and Romisch W., 2000). Πάνω στο μοντέλο του Dillon έγιναν ορισμένες τροποποιήσεις στο κομμάτι των περιορισμών αλλά και του υπολογισμού της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που υπάρχουν και μέχρι σήμερα.

➤ Μεικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (MINLP)

Αποτελεί υποκατηγορία του MILP που βασίζεται στην αλληλουχία τριών βασικών βημάτων: Μετασχηματισμός του προβλήματος που βασίζεται στη θεωρία του Μεικτού Ακέραιου Κυρτού Προγραμματισμού (Mixed Integer Convex Programming), χρήση βελτιωμένης μεθόδου επίλυσης που συνδυάζει τις τεχνικές του Branch and Bound και

του εσωτερικού σημείου (interior point method), εφαρμογή στρατηγικών επιτάχυνσης για την μείωση υπολογιστικού χρόνου (Xie Y.G. and Chiang H. D., 2010).

#### 1.1.4.2 Στοχαστικές Μέθοδοι – Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Στοχαστικές ονομάζονται οι μέθοδοι όπου στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος με την βοήθεια τυχαίων διαδικασιών βελτιστοποίησης. Για να είναι αποτελεσματικές ορίζεται μικρό εύρος δυνατών τιμών, με σκοπό την εύρεση εφικτών λύσεων μέσω μηχανισμών διόρθωσης και ένταξης ορισμένων δεδομένων σε πιθανοτικές κατανομές που κατευθύνουν τον αλγόριθμο. Είναι αναμφισβήτητα από τους πλέον συγχρόνους τρόπους αντιμετώπισης του UCP με μεγάλο περιθώριο ανάπτυξης. Παρακάτω παρατίθενται οι κυριότερες στοχαστικές μέθοδοι:

##### ➤ Έμπειρα Συστήματα (Expert Systems)

Τα Έμπειρα Συστήματα είναι ένα 'έξυπνο' προγραμματιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιεί γνώσεις και διαδικασίες εξαγωγής συμπερασμάτων για την επίλυση των προβλημάτων που είναι αρκετά δύσκολα ώστε καθιστά απαραίτητη την ανθρώπινη παρέμβαση για την επαλήθευση των λύσεων που παράγει. Αντίθετα, με τον ανθρώπινο νου τα συγκεκριμένα προγράμματα δεν μπορούν να εξελιχθούν μέσω των εμπειριών τους επομένως η γνώση πρέπει να παρέχεται από ανθρώπινο παράγοντα σε γλώσσα προγραμματισμού. Ο Mokhtari και οι συνεργάτες του (Mokhtari S. et al., 1988) ανέπτυξαν ένα πρόγραμμα εξειδίκευσης για παραδοχή βοήθειας σε μη έμπειρους χειρίστες για τον προγραμματισμό παραγωγής ισχύος και χειρισμό των μονάδων. Ο Ouyang και Shahidehrou (Ouyang, Z., & Shahidehrou, S. M., 1990) έφτιαξαν ένα σύστημα εξειδίκευσης για την ένταξη των μονάδων που αποτελούνταν από μια βάση δεδομένων προγραμμάτων ένταξης, μια δυναμική διαδικασία κάλυψης ζήτησης και βελτιστοποίησης.

##### ➤ Αλγόριθμος Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Search Algorithm)

Παρόμοια με την φυσική διαδικασία εύρεσης τροφής από ένα μυρμηγκί που αφήνει μια ουσία που λέγεται φερομόνη στο δρόμο που χαράζει για να πάει στην τροφή που ανακάλυψε, ώστε να ακολουθήσουν το ίδιο ακριβώς μονοπάτι και τα υπόλοιπα μυρμηγκιά, έτσι με την ίδια λογική ο αλγόριθμος αποτελείται από ένα πλήθος τεχνητών μυρμηγκιών τα οποία συνεργάζονται ανταλλάσσοντας πληροφορίες που τοποθετούν σε γραφικές γωνίες. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε από τους Sisworahardjo και El-Kaib (Sisworahardjo N. S. and El-Keib A. A., 2002) για την επίλυση του ΠΔΜ.

## Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι βασίζονται στην φυσική επιλογή, αποτελούν ένα ιδιαίτερα επίκαιρο και αναπτυσσόμενο πεδίο ερευνάς για την επίλυση του ΠΔΜ λόγω της δυνατότητας τους να διαχειρίζονται συναρτήσεις με μη κυρτό κόστος κατανάλωσης και μη γραμμικούς περιορισμούς. Στην παρούσα εργασία, το ΠΔΜ, όπως και το ΠΔΜ&HO, εξετάστηκε και επιλύθηκε με εξελικτικό αλγόριθμο, πιο συγκεκριμένα με τη εφαρμογή αλγορίθμου που βασίζεται στη Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution) με χρήση Πραγματικής Κωδικοποίησης (Real Coded). Ο παραπάνω αλγόριθμος που ονομάζεται Enhanced Real Coded FROFI, θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενη ενότητα. Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότεροι εξελικτικοί αλγόριθμοι:

### ➤ Απαγορευμένη Ερευνά (Tabu Search)

Ο αλγόριθμος Απαγορευμένη Ερευνά δημιουργήθηκε από τον Fred Glover (Glover F., 1986) και αποτελεί μια τεχνική που ενσωματώνει μεθόδους τοπικής αναζήτησης (Local Search Methods) ώστε να επιτευχθεί μαθηματική βελτιστοποίηση. Με τη μέθοδο της τοπικής αναζήτησης απομονώνονται περιοχές και κάθε σημείο συγκρίνεται με τα γειτονικά του με σκοπό την εύρεση καλύτερης λύσης. Για την αποφυγή ατέρμονης αναζήτησης στις επιμέρους περιοχές (λόγω περιοχής με υποβέλτιστη λύση) τα σημεία που έχουν ήδη εξεταστεί μέσα σένα μικρό χρονικό διάστημα απορρίπτονται. Για την μείωση του χρόνου 'τρέξιματος' του αλγορίθμου εντάσσονται δομές μνήμης οι οποίες κατευθύνουν την αναζήτηση προς τις πιο ελπιδοφόρες περιοχές που πιθανότατα να υπάρχει η βέλτιστη λύση.

### ➤ Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι εμπνευστήκαν από τον J. Holland (Holland J. H., 1992) με σκοπό να εισαχθεί η διαδικασία της φυσικής εξέλιξης στα υπολογιστικά συστήματα. Η μέθοδος αποτελείται από τέσσερις γενετικά - εμπνευσμένους τελεστές: επιλογή (selection), διασταύρωση (crossover), μετάλλαξη (mutation) και αντιστροφή (inversion). Ο τελεστής της επιλογής κατατάσσει τα χρωμοσώματα σε ένα πλήθος υποψήφιων διανυσμάτων για αναπαραγωγή. Η διασταύρωση επανασυνθέτει γενετικά υλικά μεταξύ δυο γονικών χρωμοσωμάτων για να δημιουργήσει δυο στοιχεία επομένης γενιάς. Η μετάλλαξη αντικαθιστά τυχαία επιλεγμένα στοιχεία όταν κάποιο τεστ πιθανοτήτων είναι θετικό και τέλος η αντιστροφή αντιστρέφει την σειρά στην οποία αρχικά είχαν καταταχθεί τα διανύσματα μεταξύ των δυο τυχαίων σημείων. (Juste K. A. et al., 1999)

### ➤ Προσομοιωποιημένη Ανόπτωση (Simulated Annealing)

Ο αλγόριθμος αυτός δημοσιεύθηκε από τους Kirkpatrick, Gela και Vecchi το 1982 και από τον Cerny το 1985. Με τον ορό Ανόπτωση εννοούμε την κατεργασία κατά την οποία ένα στερεό θερμαίνεται μέχρι κάποια υψηλή θερμοκρασία και στη συνέχεια

ψύχεται μειώνοντας την θερμοκρασία βηματικά (Wong K. P. and Wong Y.W., 1994). Επομένως, παρομοιάζοντας την ανοπτική διαδικασία με τη βελτιστοποίηση, μπορεί να επιλυθεί ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων ακολουθώντας την διαδικασία μετάβασης από την κατάσταση ισορροπίας σε κάποια άλλη, καταλήγοντας στην κατωτάτη ενέργεια. Η διαδικασία αναφέρεται σε πιθανοτική επανεξέταση του χώρου του προβλήματος όπου η αποδοχή των νέων λύσεων στο τρέχον ελέγχεται από μια πιθανοτική συνάρτηση, όπου όσο περνάει ο χρόνος λειτουργίας εμφανίζει πιο αυστηρά μέτρα αποδοχής με βάση το συνολικό κόστος. Ο αλγόριθμος χρειάζεται μεγάλο επεξεργαστικό χρόνο όμως υπάρχουν κάποια πλεονεκτήματα όπως η ανεξαρτησία από την αρχική λύση και η μαθηματική του απλότητα (Mantawy A.H. et al., 1998).

#### ➤ Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming)

Η βασική ιδέα του εξελικτικού προγραμματισμού είναι η εξέλιξη των πληθυσμών με αντικρουόμενους αλγορίθμους με σκοπό την ανάπτυξη τεχνητής νοημοσύνης (Fogel L. J. et al., 1966). Με αυτή τη μεθοδολογία αναπτύσσεται δυνατή εξάρτηση αναμεσά σε κάθε γονέα με το διάνουσμα της επομένης γενιάς, σε επίπεδο των ειδών. Πρακτικά αποτελεί την εξέλιξη της θεωρίας των γενετικών αλγορίθμων και έχει ως σκοπό να μεγιστοποιήσει την καταλληλότητα μιας συλλογής υποψήφιας λύσεων στο πλαίσιο μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός προσαρμοστικού μοντέλου με υποκατάστατα για τις διαδικασίες εξέλιξης (αναπαραγωγή με μεταβολή) κάτω από τον ανταγωνισμό. Οι υποψήφιας λύσεις μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του κόστους ή της αντικειμενικής συνάρτησης.

#### ➤ Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution)

Ο αλγόριθμος της Διαφορικής Εξέλιξης αναφέρεται στη διατήρηση ενός πληθυσμού υποψήφιας λύσεων που υποβάλλονται σε επαναλήψεις με σκοπό την συνεχή εξέλιξη του εξεταζόμενου πληθυσμού. Τα βασικά βήματα που χαρακτηρίζουν αυτόν τον αλγόριθμο είναι τα εξής: η αρχικοποίηση (initialization), η μετάλλαξη (mutation), η διασταύρωση (crossover) και η επιλογή (selection). Κατά την διαδικασία εφαρμογής αυτών των βημάτων δημιουργούνται συνεχώς δοκιμαστικά παραμετρικά διανύσματα από την πρόσθεση σταθμισμένης διανυσματικής διαφοράς δύο μελών με ένα τρίτο μέλος. Την επίλυση του ΠΔΜ με την συγκεκριμένη μέθοδο αναλύει στην εργασία του ο Τσαλαβούτης με τους συνεργάτες του (Tsalavoutis V. et al., 2016). Στην παρούσα εργασία για την επίλυση του ΠΔΜ έχει χρησιμοποιηθεί η τεχνική όπως και στην εργασία του Τσαλαβούτη και των συνεργατών του, με την διαφορά ότι έχουν ενταχθεί και τα ηλεκτρικά οχήματα ως μια νέα μεταβλητή (ΠΔΜ&ΗΟ). Επομένως, για τον αλγόριθμο της Διαφορικής Εξέλιξης έχει αφιερωθεί μια ολόκληρη ενότητα που αναλύεται η μέθοδος αυτή λεπτομερώς.

### **1.1.4.3 Υβριδικοί Αλγόριθμοι (Hybrid Algorithms)**

Οι υβριδικοί αλγόριθμοι, όπως δηλώνει και το όνομα τους, αποτελούν έναν συνδυασμό δυο ή περισσότερων μεθόδων είτε στοχαστικών είτε ντετερμινιστικών, ενσωματώνοντας τα πλεονεκτήματα αυτών για την επίλυση συνθέτων προβλημάτων. Στόχος τους είναι η επιτάχυνση της σύγκλισης στη βέλτιστη λύση αλλά και η βελτίωση

της ποιότητας της σε σχέση με μεμονωμένες προσεγγίσεις. Από μελέτες των επιμέρους τεχνικών επίλυσης καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι κάποιες είναι σχετικά απλές αλλά καταλήγουν σε μη βέλτιστη λύση ενώ άλλες είναι πολύπλοκες αλλά ακριβείς (Σπανός Α., 2019). Μερικές προσεγγίσεις που προσπάθησαν να δώσουν λύση στο πρόβλημα διεισδύσεις μονάδων παρουσιάζονται στη ν εργασία των Mallipeddi και Sugathan (Mallipedi R. and Suganthan P. N., 2014) και του B. Saravanan και συνεργατών του (Saravanan B. et al., 2013).

➤ Προσομοιωμένη Ανόπτηση και Τετραγωνικός Προγραμματισμός

Ο συγκεκριμένος υβριδικός αλγόριθμος εφαρμόζει νέους κανόνες για την παραγωγή τυχαίων αρχικών εφικτών λύσεων για το ΠΔΜ. 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 υπολογιστικό χρόνο (Mantawy A.H. et al., 1998).

➤ Έμπειρα Συστήματα με Μαθηματικό Προγραμματισμό

Τα έμπειρα συστήματα με μαθηματικό προγραμματισμό, χαρακτηρίζονται από την αναζήτηση σε ένα μικρό εύρος λύσεων σε αντίθεση με τον απλό ΕΣ που πραγματοποιείται τυφλή αναζήτηση. 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 Προτεραιότητας (Tong, S. K. et al., 1991)

➤ Υβριδική βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (Hybrid ant colony optimization)

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

➤ Υβριδική Λαγκραντζιανή Χαλάρωση (Hybrid Lagrangian relaxation)

Ο Zhang και οι συνεργάτες του (Zhang X. et al., 2009) ανέπτυξαν αυτόν τον αλγόριθμο, συνδυάζοντας την Λαγκραντζιανή Χαλάρωση (Langrangian Relaxation) για την επίλυση μεγάλης κλίμακας συστημάτων και Γενετικό Αλγόριθμο (Genetic Algorithm) για την διόρθωση των ελλείψεων του εμφανίζονται λόγω της χρήσης 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 W. and Luo X., 2008) χρησιμοποίησαν τον δυαδικό γενετικό αλγόριθμο ενσωματώνοντας μια λύση που πρόκυπτε μέσω της λίστας προτεραιότητας. Πιο συγκεκριμένα, η λύση που παράγεται, εισάγεται στον GA ως αρχικός πληθυσμός και έπειτα εξάγεται μια ολική λύση. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε σε σύστημα 10 μονάδων και κατάφερε να επιφέρει καλύτερη λύση σε σχέση με τις επιμέρους μεθόδους που συνδυάζει.

➤ Μιμητικός Αλγόριθμος (Memetic Algorithm)

Ο Μιμητικός Αλγόριθμος είναι ο συνδυασμός ενός γενετικού αλγορίθμου με χρήση τοπικών αναζητήσεων. Στόχος είναι να εκμεταλλευτεί μια τεχνική ολικής αναζήτησης για την εύρεση περιοχών με έλεγχο τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, σε συνδυασμό με την εφαρμογή ευρετικών μηχανισμών εντοπισμού των επιμέρων τοπικών βέλτιστων (Yamin H.Y., 2004).

### **1.1.5 Επίλυση Προβλήματος Δέσμησης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων**

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση του ΠΔΜ&ΗΟ αποκαλύπτει ότι οι ερευνητικές προσπάθειες σε αυτόν τον τομέα γίνονται μόλις πρόσφατα. (Madzharov D. et al., 2014). Η επίλυση του Προβλήματος Δέσμησης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων γίνεται ουσιαστικά παράλληλα με το κλασικό Πρόβλημα Δέσμησης Μονάδων, απλώς τα οχήματα εισέρχονται ως μια νέα μεταβλητή. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια μεθοδολογία βελτιστοποίησης για την ανάλυση του σύνθετου συστήματος μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ένα πλήθος δυνητικά εύκαμπτων φορτίων, με υψηλή ακρίβεια και περιορισμένο χρόνο υπολογισμού. Εάν ο αριθμός των οχημάτων είναι υψηλός, δεν είναι δυνατόν να μοντελοποιηθούν όλα αυτά τα οχήματα ως μεμονωμένες μονάδες, καθώς η πολυπλοκότητα του συστήματος θα γίνει πολύ υψηλή και πρακτικά αδύνατη για επίλυση. Ως εκ τούτου, αυτός ο αλγόριθμος προτείνει μια λύση χωρίς να παρακολουθεί το μοτίβο φόρτισης κάθε επιμέρους οχήματος, ενώ παράλληλα εντοπίζει αποτελεσματικά την επίδραση στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Madzharov D. et al., 2014). Ειδικότερα σε αυτή την εργασία, η μέθοδος επίλυσης ΠΔΜ&ΗΟ πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη αλγορίθμου βασιζόμενου στον αλγόριθμο Διαφορικής Εξέλιξης, ο οποίος κάνει χρήση πραγματικής Κωδικοποίησης. Το εξτρά φορτίο που χρειάζεται να καλυφθεί για τα ηλεκτρικά οχήματα καθορίζεται ως μια μεταβλητή και οι νέοι περιορισμοί αφορούν την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας του αλλά και την ισχύς που μπορεί να τους δοθεί μέσα σε ένα 24ωρο.

Παρακάτω αναφέρουμε περιληπτικά ορισμένες εργασίες επιστημόνων που ασχολήθηκαν με την επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων με διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων

- [A binary symmetric based hybrid meta-heuristic method for solving mixed integer unit commitment problem integrating with significant plug-in electric vehicles](#)

Η εργασία από τον Zhile Yang και τους συνεργάτες του (Yang Z. et al., 2019) προτείνει ένα μοντέλο βελτιστοποίησης που ονομάζεται ΠΔΜ&ΗΟ δηλαδή λύνει το πρόβλημα του ΠΔΜ εντάσσοντας ηλεκτρικά οχήματα σε αυτό τα οποία παίρνουν, αλλά και προσφέρουν ενέργεια στο σύστημα. Το άρθρο προσομοιάζει 50.000 τέτοια οχήματα για το σενάριο του G2V (grid to vehicles) αλλά και για το σενάριο του V2G (vehicles to grid). Στην περίπτωση του G2V, τα PEVs αυξάνουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ στη περίπτωση του V2G, τα PEVs είναι σαν μια μονάδα παραγωγής ενέργειας που προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο. Το μόνο που αλλάζει στο πρόβλημα με την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων είναι κάποιοι περιορισμοί. Αρχικά, έχουμε μια αλλαγή στη ζήτηση ενέργειας στο πρόβλημα, αυτή καθορίζεται από το αν το όχημα παίρνει ενέργεια από το δίκτυο(θετική τιμή εξτρά ενέργειας) ή προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο(αρνητική τιμή – δεν χρειάζεται εξτρά ενέργεια). Επίσης, η μέγιστη συνολική παραγωγή ενέργειας από τις θερμικές μηχανές κάθε ώρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από τη ζήτηση από UC, την εξτρά ζήτηση ή εξτρά προσφορά από ΗΟ και τα αποθεματικά από τις θερμικές μηχανές. Παράλληλα, υπολογίζεται η συνολική ενέργεια που χρειάζονται κάθε ώρα τα οχήματα. Επιπλέον, χρησιμοποιεί την μέθοδο της SADE για να δει αν ένα όχημα φορτίζεται ή αποφορτίζεται κάθε ώρα. Οι μονάδες παραγωγής θα εμφανίζονται σε ένα πίνακα από 0 και 1 (κλειστή , ανοιχτή) και η τιμή ζήτησης ή προσφοράς που αφορά τα οχήματα σε διάνυσμα. Η τιμή αυτή θα είναι είτε θετική (παίρνουν ενέργεια) είτε αρνητική(προσφέρουν ενέργεια).

- [The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid](#)

Η εργασία των Kristien Clement-Nyns και συνεργατών του (Clement-Nyns K. et al., 2011) αναφέρει ότι έρευνες μελετούν μόνο την περίπτωση όπου τα ηλεκτρικά οχήματα παίρνουν ενέργεια από δίκτυο για να φορτιστούν αλλά δεν αποφορτίζονται ώστε να παρέχουν με ενέργεια το δίκτυο. Στη συγκεκριμένη εργασία αναλύεται και η μέθοδος V2G όπου σε συνδυασμό με το ΠΔΜ, επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης άρα ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας και του λειτουργικού κόστους. Αρχικά, τονίζει ότι πρέπει να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων και του λειτουργικού δικτύου. Η επικοινωνία μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους: 1) Είτε να σταλθεί μήνυμα ξεχωριστά σε κάθε όχημα 2) Είτε να σταλθεί από ένα κεντρικό σύστημα που διευθύνει τα όλα τα οχήματα πχ. ένας χώρος για παρκινγκ 3) Είτε να σταλθεί από ένα ρυθμιστή υπεύθυνο για τα οχήματα κάποιας περιοχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έξυπνη αποθήκευση ενέργειας και προσφοράς της στο δίκτυο

με στόχο να πουλάνε ενέργεια με μέγιστο κέρδος. Για να επιτευχθεί όμως αυτό χρειάζεται να υπάρχουν ειδικά μέσα που θα ρυθμίζουν τη συχνότητα και τη διαφορά δυναμικού του δικτύου αλλά και τον όγκο ενέργειας ώστε να αποφευχθούν προβλήματα στο σύστημα. Στη συνέχεια, κάνει κάποιες υποθέσεις για τη τεχνολογία της μπαταρίας που θα χρησιμοποιούν τα οχήματα στο παρόν paper και αναφέρει ότι τα οχήματα φορτίζονται στο σπίτι των ιδιοκτών τους. Τονίζει ότι η πιο σημαντική περίοδος που πρέπει να φορτίζονται τα οχήματα είναι από το βραδύ και έπειτα ώστε να μην υπερφορτωθεί το σύστημα. Επιπλέον, επισημαίνει δυο τρόπους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων: 1) Ανεξέλεγκτη φόρτιση των οχημάτων 2) Υπό έλεγχο φόρτιση και αποφόρτιση των οχημάτων. Στην πρώτη περίπτωση, όπου δεν υπάρχει έξυπνος έλεγχος, τα οχήματα θα αρχίσουν να μπαίνουν σε διαδικασία πλήρους φόρτισης άπαξ και συνδεθούν στο δίκτυο. Έτσι, όσο περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα συνδέονται στο δίκτυο, τόσο θα αυξάνεται το πλήθος της απόκλισης τάσης, που θα είναι προβληματικό για το δίκτυο και τη σωστή λειτουργία του. Αντιθέτως, στη περίπτωση όπου θα υπάρχει έξυπνος έλεγχος φόρτισης/αποφόρτισης των οχημάτων και δεν θα επιτρέπει στους ιδιοκτήτες να φορτίζουν και αποφορτίζουν όποτε θέλουν αλλά μόνο όταν είναι αποδεκτό από το δίκτυο. Έτσι, τα οχήματα πάντα θα διαθέτουν ενέργεια που απαιτείται ανάλογα τις ανάγκες που εξυπηρετούν και το ποσοστό του πλήθους της απόκλισης τάσης του δικτύου πρακτικά γίνεται 0.

- Computational scheduling methods for integrating plug-in vehicles with power systems - a review

Αρχικά, η εργασία των Zhile Yang και συνεργατών του (Yang Z. et al., 2015) παραθέτει τους στόχους που έχουν θέσει οι χώρες με σκοπό την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και την ένταξη περισσότερων ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, αναφέρει τη τεχνολογική κατάσταση που βρίσκονται οι εταιρίες που εμπορεύονται ηλεκτρικά οχήματα, τις μεθόδους φόρτισης και αποφόρτισης των οχημάτων G2V, V2G, το οικονομικό τους αντίκτυπο, αλλά και με ποια μαθηματικά μοντέλα θα επιτευχθεί ένα βέλτιστο αποτέλεσμα. Στη συνέχεια, τονίζει ότι η σωστή μελέτη και κατασκευή μεθόδων φόρτισης και αποφόρτισης των οχημάτων είναι το κλειδί για την αποφυγή προβλημάτων στο σύστημα αλλά και την επίτευξη βέλτιστου κόστους παραγωγής ενέργειας. Μια στρατηγική προβλέπει τον καθορισμό της φόρτισης των οχημάτων να γίνεται το βραδύ που είναι ώρες μη αιχμής. Μια άλλη στρατηγική είναι αυτή που ειδικά προγράμματα επεξεργάζονται την προσφορά ενέργειας από το δίκτυο στα οχήματα, για παράδειγμα η στρατηγική αντίδρασης και ενεργητική στρατηγική. Στην στρατηγική αντίδρασης, η μέγιστη ισχύς φόρτισης ορίζεται ως ανώτερο όριο, κάθε επιπλέον φορτίο πάνω από αυτό το φορτίο αναβάλλεται. Στην ενεργητική στρατηγική το συνολικό φορτίο πρώτα υπολογίζεται και στη συνέχεια χωρίζεται σε διάφορες περιόδους φόρτισης. Τέλος, είναι και η στρατηγική του χρήστη όπου οι χρήστες των οχημάτων χρησιμοποιούν έναν 'έξυπνο ελεγκτή' (ο έξυπνος ελεγκτής βρίσκει χρονικά περιθώρια φόρτισης για να αποκτήσει οφέλη βάσει της συμπεριφοράς και της επιλογής των χρηστών) στο σπίτι για να καθοδηγήσουν τον φορτιστή PEV. Στη συνέχεια, αναλύει το UC μαζί με την ένταξη των EVs και μοντελοποιεί το πρόβλημα: 1) Ελαχιστοποίηση κόστους 2) Welfare maximisation (στόχος η μεγιστοποίηση των εσοδών των κάτοχων οχημάτων στη περίπτωση V2G) 3) Ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας κατά την παραγωγή και διανομή της 4) Μείωση εκπομπών αέριων θερμοκηπίου και πρόγραμμα ελέγχου 5) Απόδοση μπαταριών και οπτικοποίηση κόστους τους 6) Ελαχιστοποίηση



απόκλισης ισχύος. Επιπλέον, παραθέτει όλους τους ήδη γνωστούς προγραμματιστικούς αλγορίθμους και μεθόδους που έχουν προταθεί για την επίλυση του προβλήματος, με τα υπέρ και τα κατά τους. Τέλος, καταλήγει ότι η καλύτερη προσέγγιση και λύση του προβλήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση στοχαστικών αλγορίθμων. Παρόλα αυτά, ένα ευρύ φάσμα ζητημάτων παραμένει προς επίλυση για τους αλγορίθμους αυτούς όπως η επιλογή κατάλληλου τύπου αλγορίθμου, η ρύθμιση των παραμέτρων τους και το υπολογιστικό κόστος της επίλυσης του προβλήματος.

#### **1.1.6 Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων**

Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας και ανθρωπίνων αναγκών καθιστά επιτακτική ανάγκη την στροφή του ενεργειακού σχεδιασμού κάθε χώρας ξεχωριστά, αλλά και του ενιαίου ενεργειακού πλαισίου σε τρόπους παραγωγής ενέργειας οι οποίοι είναι φιλικότεροι προς το περιβάλλον. Η ποσότητα ορυκτών καυσίμων που έχει απομείνει στον πλανήτη μας είναι πια περιορισμένη και σύμφωνα με τους τωρινούς ρυθμούς θεωρείται βέβαιη η εξάντληση τους σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ταυτόχρονα, η περιβαλλοντική επιβάρυνση που επιφέρουν έχει γίνει ιδιαίτερα ανησυχητική και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που καλούνται να λύσουν οι σύγχρονοι επιστήμονες. Ως εκ τούτου, 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 φοροελαφρύνσης. Ειδικότερα, κυριότερες μορφές ΑΠΕ είναι η αιολική ενέργεια, υδραυλική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, βιομάζα και γεωθερμική ενέργεια (Σπανός Α., 2019). Υπάρχει στόχος για μαζική χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η αιολική και η ηλιακή φωτοβολταϊκή (PV) σε χώρες (π.χ. Γερμανία) ή από πολιτείες (π.χ. Καλιφόρνια). Αυτές οι ανανεώσιμες πηγές χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό μεταβλητότητας, δηλαδή παράγουν μόνο ηλεκτρική ενέργεια όταν ο άνεμος φυσά ή όταν ο ήλιος λάμπει. Μια περαιτέρω μαζική ανάπτυξη – τοποθέτηση αυτών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα καταστήσει ένα καθαρό ή υπολειπόμενο προφίλ φορτίου (όπως φαίνεται από τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής), δηλαδή θα οδηγήσει στην λιγότερη κάλυψη της ζητούμενης ισχύος από συμβατικές μηχανές (Delarue E. et al., 2013). Στην παρούσα εργασία, θα εξετάσουμε, πέρα από την συμβατική μέθοδο κάλυψης ζήτησης ενέργειας (δηλαδή επίλυσης του ΠΔΜ&ΗΟ μόνο με θερμικές μηχανές), και την επίλυση του ΠΔΜ&ΗΟ καταλήγοντας σε διαφορετικά προγράμματα παραγωγής με τη βοήθεια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αναλόγως το ποσοστό διείσδυσής τους στο σύστημα.

## 1.2 Βελτιστοποίηση

Ξεκινώντας παραγωγικά, βελτιστοποίηση είναι η προσπάθεια μεγιστοποίησης των επιθυμητών ιδιοτήτων ενός συστήματος με παράλληλη ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών του (Price K. et al., 2006). Απλούστερα, είναι η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος, η οποία υπόκειται ή όχι σε ορισμένους περιορισμούς. Συνήθως, οι παράμετροι που σχετίζονται με την επίδοση ενός συστήματος παρουσιάζονται ως ένα διάνυσμα  $\vec{X} = [x_1, x_2, \dots, x_D]$ . Η εκτίμηση του πόσο «καλή» είναι η εκάστοτε λύση γίνεται μέσω την αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) του συστήματος. Μαθηματικά, η βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία ζητείται η εύρεση του ολικού ακρότατου μιας συνάρτησης ή αλλιώς, ενός διανύσματος  $\vec{X}^*$  που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση  $f(\vec{X}) (f: \Omega \subseteq R^D \rightarrow R)$ , δηλαδή  $f(\vec{X}^*) < f(\vec{X}) \forall X \in \Omega$ . Σε προβλήματα χωρίς περιορισμούς θα είναι  $\Omega \equiv R^D$ . Με τον όρο ελαχιστοποίηση καλύπτουμε και την περίπτωση μεγιστοποίησης μιας αντικειμενικής εφόσον  $\max\{f(\vec{X})\} = -\min\{-f(\vec{X})\}$ . Η μη γραμμικότητα και η μη παραγωγισιμότητα των αντικειμενικών συναρτήσεων, εκτός του ότι εισήγαγε την αναγκαιότητα για χρήση εξελικτικών αλγορίθμων λόγω αδυναμίας υπολογισμού των παραγώγων από τις κλασσικές μαθηματικές μεθόδους, περιπλέκει το ζήτημα εύρεσης ολικών ακροτάτων λόγω ύπαρξης πολλών τοπικών. Ένα τοπικό ελάχιστο συμβολίζουμε  $f_l = f(\vec{X}_l)$  και ορίζουμε ως  $\exists \varepsilon > 0 \forall \vec{X} \in \Omega: |\vec{X} - \vec{X}_l| < \varepsilon \Rightarrow f_l \leq f(\vec{X}_l)$ . (Πλατανιώτης Δ.-Α., 2018) (Suganthan S. and Das P. N.)

### 1.2.1 Βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς

Στη διαδικασία επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς (constrained optimization) με εξελικτικούς αλγόριθμους, υψίστης σημασίας διεργασία αποτελεί η αποτελεσματική διαχείριση των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην παρούσα φάση, χωρίς βλάβη της γενικότητας, για προβλήματα ελαχιστοποίησης η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή

$$\min f(\vec{x}), x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_D] \in \Omega, L_i \leq x_i \leq U_i$$

υπό τους περιορισμούς:

$$g_j(\vec{x}) \leq 0, j = 1, \dots, l$$

$$h_j(\vec{x}) = 0, j = l + 1, \dots, m$$

όπου  $\vec{x}$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης με πλήθος  $D$ ,  $L_i$ ,  $U_i$  είναι τα φυσικά ή τεχνικά ελάχιστα ή μέγιστα αντίστοιχα όρια για κάθε μία από της μεταβλητές απόφασης.  $l$ ,  $(m-l)$  είναι το πλήθος των περιορισμών ανισότητας και ισότητας αντίστοιχα. Στην βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς, ο βαθμός παραβίασης του περιορισμού  $j$  για κάθε άτομο του πληθυσμού υπολογίζεται ως εξής:

$$G_j(\vec{x}) = \begin{cases} \max\{0, g_j(\vec{x})\} & 1 \leq j \leq l \\ \max\{0, |h_j(\vec{x})| - \delta\} & l+1 \leq j \leq m \end{cases}$$

,όπου το  $\delta$  είναι μία θετική ποσότητα για τη χαλάρωση του περιορισμού ισότητας σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Έπειτα, το άθροισμα  $G(\vec{x}) = \sum_{j=1}^m G_j(\vec{x})$  αντιπροσωπεύει το βαθμό παραβίασης όλων των περιορισμών από την υποψήφια λύση  $\vec{x}$ . Μέσω λοιπόν της σχέσεως (1.1) συνάγουμε ότι ένα διάνυσμα μεταβλητών απόφασης  $\vec{x}$  θα ονομάζεται εφικτό (feasible) όταν  $G(\vec{x}) = 0$ , ενώ σε άλλη περίπτωση ανέφικτο (infeasible). (Πλατανιώτης Δ.-Α., 2018) (Wang Y. et al., 2015)

## 1.2.2 Τεχνικές διαχείρισης περιορισμών

Λόγω της ύπαρξης περιορισμών σε διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι διαχείρισης περιορισμών σε συνεργασία με εξελικτικούς αλγόριθμους. Οι κυριότερες εξ αυτών κατηγοριοποιούνται ως εξής: μέθοδοι βασισμένοι στη συνάρτηση ποινής (penalty function) (Hamida S. B. and Schoenauer M., 2002), μέθοδοι βασισμένοι στην προτίμηση εφικτών λύσεων συγκριτικά με ανέφικτες (Deb K., 2000) και μέθοδοι πολλαπλών κριτηρίων (πολυκριτηριακής) βελτιστοποίησης (multi-objective optimization) (Coello A. C., 2000). Συγκεκριμένα, μετά τη παραγωγή απογόνων από τον εξελικτικό αλγόριθμο κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης, ζητούμενο των μεθόδων διαχείρισης περιορισμών είναι ο καθορισμός ενός κριτηρίου σύγκρισης μεταξύ απογόνων και γονέων. Στις μεθόδους με συνάρτηση ποινής κατασκευάζεται μία αντικειμενική συνάρτηση προσθέτοντας έναν όρο ποινής ανάλογα με την παραβίαση περιορισμών και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των ατόμων. Στις μεθόδους που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία, η σύγκριση μεταξύ των ατόμων πραγματοποιείται είτε μέσω του βαθμού παραβίασης περιορισμών είτε μέσω της τιμής της αντικειμενικής. Έως ένα βαθμό, οι εφικτές λύσεις προτιμώνται έναντι των ανέφικτων. Επιπρόσθετα, πολυκριτηριακές τεχνικές χρησιμοποιούν περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις, για παράδειγμα  $f(\vec{x})$ ,  $G(\vec{x})$  και έπειτα χρησιμοποιείται συνήθως σχήμα Pareto για τη σύγκριση των ατόμων.

Γενικά ένας εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς οφείλει να εισάγει στα πρώτα στάδια τα άτομα στον χώρο αποδεκτών λύσεων και τελικά να βρίσκει τη βέλτιστη λύση. Για την υλοποίηση του πρώτου βήματος, η σύγκριση των ατόμων εξαρτάται κυρίως από τους περιορισμούς στις περισσότερες μεθόδους διαχείρισης περιορισμών, γεγονός που παραμελεί την πληροφορία της αντικειμενικής συνάρτησης και επομένως δρα αρνητικά στην εύρεση του ολικού βέλτιστου.

Μία προσπάθεια για την αντιμετώπιση της παραπάνω αδυναμίας προτάθηκε από τον Y.Wang και τους συνεργάτες του (Wang Y. et al., 2015), η μέθοδος ονομάστηκε Κανόνας Εφικτότητας με ενσωμάτωση πληροφορίας της αντικειμενικής συνάρτησης (Feasibility Rule with the incorporation of Objective Function Information – FROFI). Η μέθοδος FROFI πρακτικά είναι ένας εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς (Constrained Optimization Evolutionary Algorithm – COEA). Περιλαμβάνει έναν εξελικτικό αλγόριθμο (Διαφορική Εξέλιξη) και έναν τρόπο διαχείρισης περιορισμών (Κανόνες Εφικτότητας). Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος που ασχολείται η εργασία έχει ως βάση τον FROFI, όπου με κάποιες μετατροπές από τον Τσαλαβούτη Βασίλη (Tsalavoutis V. et al., 2017) και

την ομάδα του δημιούργησαν τον αλγόριθμο (Enhanced Real Coded - Feasibility Rule with the incorporation of Objective Function Information ERC-FROFI). Ουσιαστικά είναι ο FROFI με μια προσέγγιση Ενισχυμένης Πραγματικής Κωδικοποίησης. Η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ERC-FROFI για την επίλυση του βασικού προβλήματος ΠΔΜ και με κάποιες προσαρμογές, που θα αναλυθούν παρακάτω, παράχθηκαν πρωτοποριακά και πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα με σκοπό την επίλυση του ΠΔΜ&ΗΟ.

### **1.3 Αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης (DE)**

#### **1.3.1 Εισαγωγή**

Μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι. Χρησιμοποιώντας τον όρο εξελικτικός αλγόριθμος αναφερόμαστε στη διαδικασία δημιουργίας και εξέλιξης ενός πληθυσμού. Στη συνέχεια, ο πληθυσμός αυτός εισάγεται τυχαία στο χώρο λύσεων με στόχο την επίτευξη ενός επιθυμητού αποτελέσματος. Οι ρίζες των εξελικτικών αλγορίθμων βρίσκονται στην περίοδο του 1950, όπου εφευρέθηκε η ιδέα χρήσης της θεωρίας εξέλιξης του Δαρβίνου για αυτοματοποιημένη επίλυση προβλημάτων. Έτσι λοιπόν την δεκαετία του 1960, ο Lawrence J. Fogel παρουσιάζει την πρώτη μέθοδο εξελικτικού προγραμματισμού (Evolutionary Programming – EP) στην Αμερική, παράλληλα στη Γερμανία οι I. Rechenberg και H.-P. Schwefel εισάγουν τις εξελικτικές στρατηγικές (Evolutionary Strategies – ESs). Ενώ έπειτα από μία δεκαετία ο John Henry Holland, του πανεπιστημίου Michigan, Ann Arbor, χρησιμοποιώντας την εξελικτική θεωρία του Δαρβίνου, εμφανίζει τους γενετικούς αλγορίθμους (GA) (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010). Η μέθοδος της διαφορικής εξέλιξης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 1997 από τους Storn και Price (Storn R. and Price K., 1997). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η τεχνική της διαφορικής εξέλιξης εντάσσεται στην κατηγορία των μετά-ευρετικών/ στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης με βασικό πλεονέκτημα την απλότητά της, γεγονός που την καθιστά εύκολη στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης σε ποικίλα επιστημονικά πεδία (Πλατανιώτης Δ.-Α., 2018)

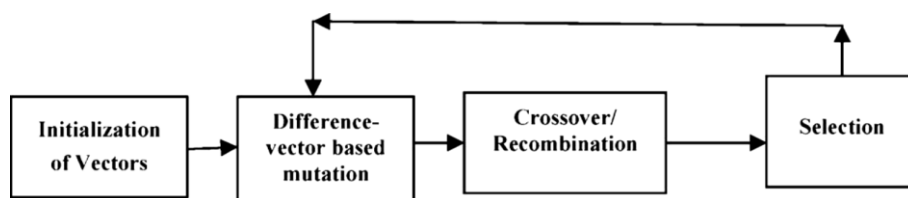
#### **1.3.2 Περιγραφή Αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης (DE)**

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αποτελούν (EA, επίσης γνωστός ως εξελικτικός υπολογισμός) στοχαστικούς αλγορίθμους αναζήτησης και βελτιστοποίησης που προέρχονται από τις φυσικές αρχές εξέλιξης. Οι EA περιλαμβάνουν τρεις αλγορίθμους κύριων ροών, Γενετικούς Αλγόριθμους (GA), Εξελικτικό Προγραμματισμό (EP) και Εξελικτικές Στρατηγικές (ES). Αυτοί οι αλγόριθμοι είναι ισχυροί, προσαρμοστικοί και έχουν βρει την εφαρμογή τους σε μια ευρεία ποικιλία θεωρητικών και πρακτικών προβλημάτων που περιλαμβάνουν εργασίες αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Διαφορετικοί από τις τεχνικές βελτιστοποίησης βασισμένες στον παραδοσιακό λογισμό, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι χειρίζονται έναν πληθυσμό 'προσωρινών' λύσεων, τις οποίες και επεξεργάζονται με ορισμένους εξελικτικούς τελεστές για να βρουν μία καλή λύση στο υπό εξέταση πρόβλημα, αν όχι το ολικό βέλτιστο του προβλήματος. Η

διαδικασία αναζήτησης και βελτιστοποίησης ακολουθεί την αρχή της επιβίωσης του ικανότερου και παράγει διαδοχικά καλύτερα αποτελέσματα σε γενιές έως τελικά βρει την καλύτερη δυνατή λύση (Wong K. P. and Dong Z. Y., 2005).

Η Διαφορική Εξέλιξη (DE) είναι μια υποκατηγορία των ΕΑ. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της DE είναι ότι χρησιμοποιεί τις διαφορές τυχαία επιλεγμένων αντικειμενικών διανυσμάτων από τον πληθυσμό των λύσεων και καθοδηγεί τη λειτουργία μετάλλαξης αντί να χρησιμοποιεί κατανομές πιθανοτήτων όπως ΕΑ. Επειδή η κατανομή των αντικειμενικών διανυσμάτων καθορίζεται κυρίως από την τοπογραφία της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης, οι κλίσεις στις οποίες η DE προσπαθεί να βελτιστοποιήσει το πρόβλημα ταιριάζουν με εκείνες της συνάντησης που πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Αυτό επιτρέπει στην DE να λειτουργήσει δυναμικά και περισσότερο σαν ένας γενικότερος βελτιστοποιητής συγκριτικά με τους άλλους ΕΑ. (Wong K. P. and Dong Z. Y., 2005)

Η μέθοδος της διαφορικής εξέλιξης είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης πραγματικών μεταβλητών, που λειτουργεί κυκλικά όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι τέσσερις βασικές διεργασίες της DE.



Σχήμα 1.1: Βασικά στάδια του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010)

### 1.3.2.1 Αρχικοποίηση του πληθυσμού της DE

Η DE αναζητά το ολικό βέλτιστο μιας αντικειμενικής συνάρτησης σε ένα χώρο πραγματικών αριθμών  $R^D$ . Η πρώτη διαδικασία που λαμβάνει χώρα είναι η τυχαία αρχικοποίηση των ατόμων του πληθυσμού  $NP$ , καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύεται από ένα διάνυσμα  $D$  διαστάσεων με πραγματικές τιμές. Τα διανύσματα αυτά αποτελούν τις υποψήφιες λύσεις του προβλήματος και αποκαλούνται γονίδια ή χρωμοσώματα. Ο αρχικός αυτός πληθυσμός ατόμων φυσικά μέσω της εξέλιξης-καλύτερευσης θα μεταλλαχθεί, οπότε εισάγουμε το δείκτη  $G = 0, 1, \dots, G_{max}$  που συμβολίζει τον αριθμό της γενιάς που βρίσκεται ο εκάστοτε πληθυσμός. Συμβολίζουμε λοιπόν μία υποψήφια λύση του πληθυσμού, του ατόμου  $i$  στη γενιά  $G$  ως:

$$\vec{X}_{i,G} = [x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, x_{3,i,G}, \dots, x_{D,i,G}], \quad i = 1, \dots, NP \quad (1.2)$$

Για κάθε παράμετρο του ανωτέρου διανύσματος θα πρέπει να υπάρχουν φυσικά αριθμητικά όρια, ανάλογα με την ποσότητα την οποία αυτή αντιπροσωπεύει. Όπως θα

δούμε και στη συνέχεια, οι τιμές αυτές ορίζονται από την ελάχιστη και μέγιστη παραγωγική ικανότητα κάθε μονάδας, ενώ συμβολίζουμε

$$\vec{X}_{min} = [x_{1,min}, x_{2,min}, \dots, x_{D,min}], \quad \vec{X}_{max} = [x_{1,max}, x_{2,max}, \dots, x_{D,max}]$$

αντίστοιχα. Κατά την αρχικοποίηση του πληθυσμού, οφείλουμε να καλύψουμε όσο τον δυνατό ομοιόμορφα το πεδίο αναζήτησης λύσεων, με αποτέλεσμα το σχήμα που χρησιμοποιείται αρχικά για το στοιχείο  $j$  του ατόμου  $i$  την γενιά  $G=0$  να λαμβάνει τη μορφή

$$x_{j,i,0} = x_{j,min} + rand_{i,j}[0,1] \cdot (x_{j,max} - x_{j,min}) \quad (1.3)$$

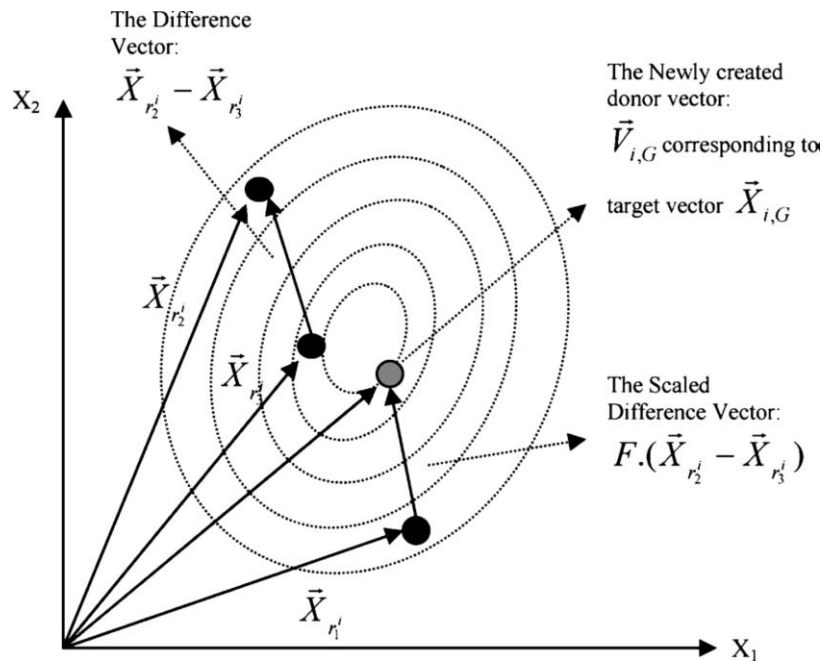
όπου η  $rand_{i,j}[0,1]$  είναι μια γεννήτρια τυχαίων ομοιόμορφα κατανομημένων αριθμών μεταξύ 0 και 1 (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010).

### 1.3.2.2 Μετάλλαξη (Mutation) και διαφορά διανυσμάτων

Βιολογικά, με τον όρο μετάλλαξη αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε μεταβολή μπορεί να συμβεί στο γενετικό υλικό ενός οργανισμού. Στους εξελικτικούς, και ειδικότερα στη βιβλιογραφία της διαφορικής εξέλιξης, στο πιο απλό σχήμα μετάλλαξης, το δiάνυσμα μετάλλαξης (mutant/ donor vector)  $\vec{V}$  προκύπτει από την διανυσματική πρόσθεση τριών διανυσμάτων τυχαία επιλεγμένων από τον πληθυσμό ως:

$$\vec{V}_{i,G} = \vec{X}_{r_1^i,G} + F \cdot (\vec{X}_{r_2^i,G} - \vec{X}_{r_3^i,G}) \quad (1.4)$$

Οι δείκτες  $r_1, r_2, r_3$  επιλέγονται τυχαία από το συνολικό σώμα του πληθυσμού  $[1, NP]$ , και όπως φαίνεται από την εξίσωση (1.4) η διαφορά που προστίθεται στο δiάνυσμα βάσης  $\vec{X}_{r_1^i}$ , για να προκύψει το mutant, καθορίζεται από μία εκ των παραμέτρων ελέγχου της DE, του παράγοντα  $F$  ο οποίος συνήθως κείται στο διάστημα  $[0.4, 1]$ . Στο σχήμα 1.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται το δiάνυσμα μετάλλαξης, όπως αυτό υπολογίζεται μέσω της σχέσεως 1.4. (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010).



Σχήμα 1.2: Απλό σχήμα μετάλλαξης DE της εξ (1.4) (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010)

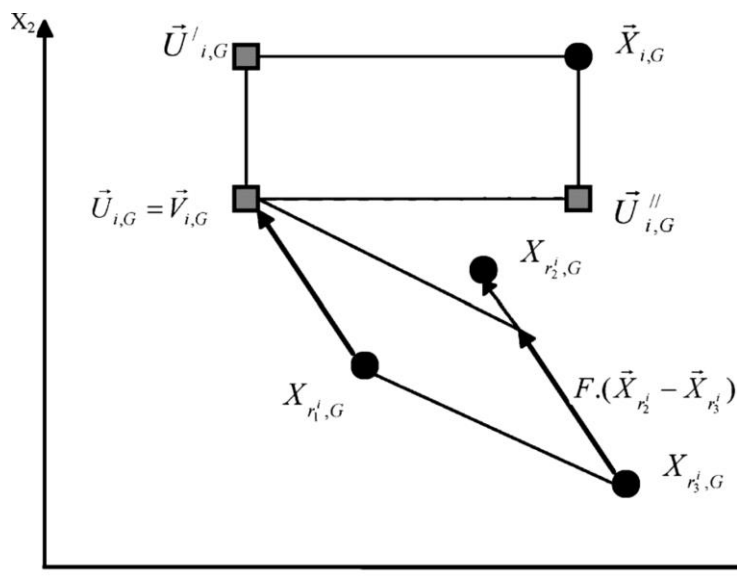
### 1.3.2.3 Διασταύρωση (Crossover)

Η συγκεκριμένη διαδικασία λαμβάνει χώρα με στόχο τη διατήρηση της ποικιλομορφίας κατά την εξέλιξη ενός πληθυσμού. Έχοντας λοιπόν το διάνυσμα  $\vec{V}_i$  από τη μετάλλαξη, συμβαίνει ανασυνδυασμός στοιχείων με το αντίστοιχο διάνυσμα του γονέα  $i$  το οποίο καλείται parent/ target vector  $\vec{X}_{i,G}$  και προκύπτει τελικά ο απόγονος (offspring/ trial vector)  $\vec{U}_i$ .

$$\vec{U}_{i,G} = [u_{1,i,G}, u_{2,i,G}, u_{3,i,G}, \dots, u_{D,i,G}] \quad (1.5)$$

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι για την ανταλλαγή στοιχείων μεταξύ μεταλλαγμένου και γονέα: η εκθετική (two-point modulo) και η διωνυμική (uniform) διασταύρωση (Price K. et al., 2006). Προκειμένου στην υλοποίηση των δύο ανωτέρω μεθόδων απαιτείται η εισαγωγή μιας ακόμα μεταβλητής ελέγχου, ο βαθμός διασταύρωσης (crossover rate)  $Cr$ . Ειδικότερα, για το σχήμα της διωνυμικής μεθόδου, το κάθε ένα από τα  $D$  στοιχεία του κάθε απογόνου προκύπτει από την σύγκριση τυχαία παραγόμενων αριθμών στο διάστημα  $[0, 1]$  με την τιμή της παραμέτρου  $Cr$  ( $Cr_{pool}=[0.1, 0.2, 1]$ ) βάσει του παρακάτω σχήματος:

$$u_{j,i,G} = \begin{cases} v_{j,i,G} & \text{if } (rand_{i,j} \leq Cr \text{ or } j = jrand) \\ x_{j,i,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.6)$$



Σχήμα 1.3: Πιθανά διανύσματα απογόνων (trial v.) από διωνυμική διασταύρωση σε χώρο 2D (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010)

Όπως στην μετάλλαξη ο όρος  $rand_{i,j}[0,1]$  είναι μία γεννήτρια ομοιόμορφα κατανεμημένων αριθμών μεταξύ 0,1. Παρατηρούμε ότι η εξίσωση (1.6) μέσω της ισότητας  $j = j_{rand}$ , υποχρεώνει τον κάθε απόγονο να λαμβάνει τουλάχιστον ένα στοιχείο από το μεταλλαγμένο διάνυσμα, έτσι ώστε κανένας απόγονος να μην είναι ταυτόσημος με τον γονέα. Η παράμετρος  $Cr$  ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την πιθανότητα που έχει κάθε στοιχείο του διανύσματος του απογόνου να υιοθετηθεί από το μεταλλαγμένο διάνυσμα. Τέλος, στο σχήμα 1.3 οι τρεις περιπτώσεις διωνυμικής διασταύρωσης που παρουσιάζονται στο χώρο για διανύσματα δύο διαστάσεων μεταξύ γονέα  $\vec{X}_{i,G}$ , μεταλλαγμένου  $\vec{V}_{i,G}$  και απογόνου  $\vec{U}_{i,G}$  είναι οι εξής (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010):

1.  $\vec{U}_{i,G} = \vec{V}_{i,G}$ , δηλαδή και τα δύο στοιχεία  $j=1, j=2$  του διανύσματος είναι υιοθετημένα από το μεταλλαγμένο.
2.  $\vec{U}'_{i,G}$ , όπου το στοιχείο  $j=1$  υιοθετείται από το  $\vec{V}_{i,G}$  και το  $j=2$  από το  $\vec{X}_{i,G}$
3.  $\vec{U}''_{i,G}$ , όπου το στοιχείο  $j=1$  υιοθετείται από το  $\vec{X}_{i,G}$  και το  $j=2$  από το  $\vec{V}_{i,G}$

#### 1.3.2.4 Επιλογή (Selection)

Η διαδικασία της επιλογής είναι εκείνη που σταδιακά οδηγεί στη βελτίωση των ιδιοτήτων του πληθυσμού και τελικά στη μέγιστη δυνατή βελτιστοποίηση του ζητούμενου. Η αξιολόγηση λοιπόν και η επιβίωση των διανυσμάτων που προκύπτουν καθορίζεται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιφέρουν. Στην DE για τη διατήρηση σταθερού αριθμού ατόμων του πληθυσμού, εκτελείται σύγκριση μεταξύ γονέα (parent/target) και απογόνου (offspring/trial) και επιβιώνει στην επόμενη γενιά  $G = G+1$ , εκείνος του οποίου, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει χαμηλότερη τιμή, συγκεκριμένα:



$$\vec{X}_{i,G+1} = \begin{cases} \vec{U}_{i,G} & \text{if } f(\vec{U}_{i,G}) \leq f(\vec{X}_{i,G}) \\ \vec{X}_{i,G} & \text{if } f(\vec{U}_{i,G}) > f(\vec{X}_{i,G}) \end{cases} \quad (1.7)$$

όπου  $f(X)$  είναι η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Επομένως, εάν το νέο δοκιμαστικό διάνυσμα αποφέρει μια ίση ή χαμηλότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, αντικαθιστά το αντίστοιχο διάνυσμα - στόχο στην επόμενη γενιά, διαφορετικά ο στόχος διατηρείται στον πληθυσμό. Ως εκ τούτου, ο πληθυσμός είτε βελτιώνεται (σε σχέση με την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής λειτουργίας) είτε παραμένει ο ίδιος, αλλά ποτέ δεν χειροτερεύει. Το διάνυσμα - στόχος αντικαθίσταται από το δοκιμαστικό διάνυσμα ακόμα και αν και οι δύο αποδίδουν την ίδια τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης - ένα χαρακτηριστικό που επιτρέπει στα ΔΕ - διανύσματα να μετακινούνται πάνω σε επίπεδα τοπία καταλληλότητας με γενιές. Συνήθως πάντα για προβλήματα ελαχιστοποίησης, μια χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης θα αντιστοιχεί σε υψηλότερη καταλληλότητα. (Das, S., & Suganthan, P. N., 2010)

### 1.3.2.5 Παράμετροι ελέγχου της DE

Οι παράμετροι ελέγχου της διαφορικής εξέλιξης είναι στον αριθμό τρεις: το μέγεθος του πληθυσμού  $NP$ , ο παράγοντας  $F$  στη διαδικασία μετάλλαξης και η σταθερά διασταύρωσης  $Cr$ . Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι μία από τις προτεινόμενες τιμές του πληθυσμού στη βιβλιογραφία (Storn R. and Price K., 1997) είναι η  $5-10D$ , όπου  $D$  είναι ο αριθμός των διαστάσεων του προβλήματος. Εν συνεχεία, μία αποδοτική τιμή για την παράμετρο της μετάλλαξης  $F$  είναι από 0.4-1.0. Τέλος, ως αναφέρθηκε προηγουμένως αύξηση της τιμής της παραμέτρου διασταύρωσης  $Cr$ , κοντά στη μονάδα, επιτρέπει την υιοθέτηση περισσότερων στοιχείων από το μεταλλαγμένο διάνυσμα στον απόγονο. (Πλατανιώτης Δ.-Α., 2018)

## 1.4 Κανόνες Εφικτότητας – Feasibility Rule

Η συγκεκριμένη τεχνική προτάθηκε από τον (Deb K., 2000) και λειτουργεί ως μέθοδος διαχείρισης περιορισμών. Ανήκει στην δεύτερη κατηγορία που αναφέρθηκε παραπάνω και μεταχειρίζεται τα άτομα των πληθυσμών ως εξής:

- 1) Μεταξύ δύο ανέφικτων λύσεων, προτιμάται εκείνη με το χαμηλότερο βαθμό παραβίασης περιορισμών.
- 2) Μεταξύ μιας ανέφικτης και μιας εφικτής λύσης, προτιμάται η εφικτή.
- 3) Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων, προτιμάται εκείνη με την καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης.

Στην περίπτωση που η μέθοδος αυτή συνδυαστεί με την διαφορική εξέλιξη, όπως προαναφέρθηκε, επηρεάζουν τη σύγκριση μεταξύ γονέα και απογόνου που πλέον δεν πραγματοποιείται βάσει της τιμής της αντικειμενικής, αλλά βάσει των τριών κανόνων της μεθόδου Feasibility Rule. (Tsalavoutis V. et al., 2017)

## 1.5 FROFI

Η αναφορά στη διαφορική εξέλιξη πραγματοποιήθηκε με στόχο την ομαλή εισαγωγή στο υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση και τη διαχείριση των περιορισμών του ΠΔΜ. Ο FROFI ανήκει στην οικογένεια των εξελικτικών αλγορίθμων για βελτιστοποίηση προβλημάτων υπό περιορισμούς. Στον FROFI ο αλγόριθμος της DE χρησιμοποιείται ως μηχανή αναζήτησης της βέλτιστης λύσης ενώ ο κανόνας εφικτών λύσεων (feasibility rule) (Deb K.,) χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των ατόμων του πληθυσμού. Κατά την διαδικασία της εξέλιξης, αν ένας απόγονος που παράχθηκε από τη διασταύρωση της DE είναι χειρότερος από τον γονέα βάσει του κανόνα εφικτότητας, αλλά έχει καλύτερη τιμή αντικειμενικής, τότε ο απόγονος αποθηκεύεται σε ένα προκαθορισμένο αρχείο  $A$ . Στη συνέχεια, τα άτομα που ευρίσκονται στον τελευταίο χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση άλλων ατόμων του πληθυσμού μέσω ενός μηχανισμού αντικατάστασης (replacement mechanism). Επιπλέον, στην εργασία (Wang Y. et al., 2015) προτείνεται μία στρατηγική μετάλλαξης, η οποία βοηθά των αλγόριθμο να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά ακρότατα ανέφικτων περιοχών. Σημειώνουμε επίσης ότι στο μηχανισμό αντικατάστασης και στη στρατηγική μετάλλαξης του FROFI, η σύγκριση μεταξύ των ατόμων γίνεται βάσει της τιμής της αντικειμενικής τους συνάρτησης. (Πλατανιώτης Δ.-Α., 2018)

### 1.5.1 Μηχανισμοί του αλγορίθμου FROFI

Όπως κάθε εξελικτικός, η πρωταρχική διαδικασία που υλοποιείται είναι η αρχικοποίηση του πληθυσμού του FROFI, με την ίδια ακριβώς διαδικασία που περιεγράφηκε στην DE. Έτσι, ο αρχικός πληθυσμός με  $NP$  άτομα την γενιά  $G = 1$  συμβολίζεται:

$$Pop_1 = [\vec{x}_{1,G=1}, \dots, \vec{x}_{NP,G=1}] \quad (1.8)$$

όπου, το κάθε  $i$  άτομο του πληθυσμού στην  $G$  γενιά, αποτελεί υποψήφια λύση του προβλήματος:

$$\vec{x}_{i,G} = [x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, x_{3,i,G}, \dots, x_{D,i,G}] \quad (1.9)$$

Τα όρια στα οποία κείται η τιμή των παραμέτρων των διανυσμάτων υποψήφιων λύσεων καθορίζονται από την μέγιστη και ελάχιστη καθαρή ισχύ που μπορούν να προσδίδουν στο σύστημα. Ο αρχικοποιημένος πληθυσμός εξελίσσεται με την πάροδο των γενεών μέσω των μηχανισμών που περιγράφονται παρακάτω. (Tsalavoutis V. et al., 2017)

### 1.5.2 DE διαδικασίες στον FROFI

Για την διατήρηση όσο το δυνατόν τυχαιότητας κατά τη μετάλλαξη, χρησιμοποιούνται δύο στρατηγικές μετάλλαξης με ίση πιθανότητα (0.5) ώστε να συμβούν. Τα σχήματα λοιπόν μετάλλαξης που εφαρμόζονται στο άτομο  $i$  του πληθυσμού  $i \in [1, NP]$ , του γονέα (parent/target vector) της γενιάς  $G = gen$  για την παραγωγή του διανύσματος μετάλλαξης είναι τα εξής:

1) DE/current-to-rand/1

$$\vec{v}_{i,gen} = \vec{x}_{i,gen} + U(0,1) \cdot (\vec{x}_{r1,gen} - \vec{x}_{i,gen}) + F \cdot (\vec{x}_{r2,gen} - \vec{x}_{r3,gen}) \quad (1.10)$$

2) DE/rand-to-best/1

$$\vec{v}_{i,gen} = \vec{x}_{i,gen} + U(0,1) \cdot (\vec{x}_{best,gen} - \vec{x}_{r1,gen}) + F \cdot (\vec{x}_{r2,gen} - \vec{x}_{r3,gen}) \quad (1.11)$$

Όπου  $r_1, r_2, r_3$  είναι τρεις διαφορετικοί δείκτες του πληθυσμού,  $U(0,1)$  μία γεννήτρια ομοιόμορφα κατανομημένων αριθμών στο  $[0,1]$ , ενώ με  $F$  συμβολίζουμε την παράμετρο της μετάλλαξης που εισάγει η DE. Η τιμή της παραμέτρου  $F$  εκλέγεται τυχαία κάθε φορά παίρνοντας μία από τις διακριτές τιμές (1.0, 0.8, 0.6). Επιπλέον, αναφέρουμε ότι στην στρατηγική DE/rand-to-best/1 στο άτομο  $\vec{x}_{best}$  είναι το άτομο το οποίο έχει την καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, ανεξαρτήτως του βαθμού παραβίασης περιορισμών του. (Πλατανιώτης Δ.-Α., 2018) (Tsalavoutis V. et al., 2017)

Η διαδικασία της διασταύρωσης υλοποιείται με την ίδια ακριβώς λογική της DE, όπου τα στοιχεία του απογόνου παράγονται από ένα διωνυμικό σχήμα μέσω της ακόλουθης σχέσεως:

$$u_{i,j,G} = \begin{cases} v_{i,j,G} & \text{if } (rand_{i,j} \leq Cr \text{ or } j = j_{rand}) \\ x_{i,j,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.12)$$

Όπου,  $j=1, \dots, D$  ενώ η παράμετρος ελέγχου της διασταύρωσης  $Cr$  εκλέγεται τυχαία κάθε φορά λαμβάνοντας μία εκ των διακριτών τιμών (0.1, 0.2, 1.0). Σημειώνουμε εδώ ότι η διαδικασία διασταύρωσης (crossover operator) εφαρμόζεται μόνο στην πρώτη διαδικασία στρατηγικής που περιγράφηκε.

Ο κανόνας εφικτότητας (Feasibility Rule) εφαρμόζεται όπως ακριβώς περιεγράφηκε. Υπενθυμίζουμε ότι βάσει αυτού, αν ένας απόγονος – άτομο δεν επιλέγεται να επιβιώσει στην επόμενη γενιά, λόγω παραβίασης περιορισμών, αλλά η τιμή της αντικειμενικής

του είναι μικρότερη του γονέα, τότε αποθηκεύεται σε ένα προκαθορισμένων διαστάσεων αρχείο  $A$ , και πιθανόν σε μελλοντικές γενεές να αντικαταστήσει κάποιο άτομο του πληθυσμού μέσω του μηχανισμού αντικατάστασης. (Πλατανιώτης Δ.-Α., 2018) (Tsalavoutis V. et al., 2017)

### 1.5.3 Μηχανισμός αντικατάστασης

Στόχος της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί η διατήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού στα πρώτα στάδια του αλγορίθμου, καθώς και η ταχύτερη σύγκλιση αυτού σε μεταγενέστερα στάδια. Η διαδικασία έχει ως εξής:

Αρχικά, όλα τα άτομα της τρέχουσας γενιάς κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά βάσει της τιμής της αντικειμενικής τους συνάρτησης και χωρίζονται σε MRN ίσα μέρη. Το άτομο με τη μεγαλύτερη παραβίαση περιορισμού από την πρώτη κατάταξη ( $\vec{x}_a$ ) συγκρίνεται με το άτομο που έχει την ελάχιστη παραβίαση περιορισμού στο αρχείο  $A$  ( $\vec{x}_b$ ) βάσει τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Αν  $f(\vec{x}_b) < f(\vec{x}_a)$ , τότε το άτομο ( $\vec{x}_a$ ) αντικαθιστά στον πληθυσμό το ( $\vec{x}_b$ ) και διαγράφεται από το μητρώο  $A$ . Η διαδικασία αντικατάστασης τερματίζεται αν ανανεωθούν όλα τα MRN μέρη ή αν ο πίνακας  $A$  αδειάσει. Συμπερασματικά, ο αριθμός MRN καθορίζει το πλήθος πιθανών αντικαταστάσεων σε κάθε γενιά. (Tsalavoutis V. et al., 2017)

### 1.5.4 Στρατηγική μετάλλαξης

Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στην περίπτωση όπου όλες οι υποψήφια λύσεις – άτομα του πληθυσμού είναι ανέφικτες. Εκλέγεται λοιπόν τυχαία ένα άτομο ( $\vec{x}_c$ ) από τον πληθυσμό. Επιλέγεται επίσης τυχαία μία διάσταση έστω  $k$  του ( $\vec{x}_c$ ) και λαμβάνει μία τυχαία εφικτή τιμή ανάμεσα στα επιτρεπόμενα όρια. Δημιουργείται λοιπόν ένα μεταλλαγμένο διάνυσμα ( $\vec{x}_d$ ) και στη συνέχεια, αν  $f(\vec{x}_d) < f(\vec{x}_c)$ , όπου ( $\vec{x}_c$ ) το άτομο με τη μεγαλύτερη παραβίαση περιορισμού του πληθυσμού, τότε το ( $\vec{x}_d$ ) αντικαθιστά το ( $\vec{x}_c$ ).

## 1.6 ERC FROFI για το ΠΔΕ+ΗΟ

Για την επίλυση του προβλήματος δέσμμευσης μονάδων χρησιμοποιήθηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος ERC – FROFI που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο του τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Στη μέθοδο αυτή τα δύο υπό-προβλήματα δέσμμευσης μονάδων (UC) και κατανομής φορτίου (ED) λύνονται παράλληλα, λαμβάνοντας υπόψη και την κάλυψη της ζήτησης του εξτρά φορτίου από ηλεκτρικά οχήματα που εισέρχονται στο σύστημα. Το διάνυσμα κάθε υποψήφιας λύσης περιλαμβάνει τα ακριβή ποσά ισχύος που προσδίδει κάθε μονάδα για κάθε ώρα και τα ποσά ισχύος που χρησιμοποιούνται για την επαναφόρτιση κάθε κατηγορία οχημάτων για κάθε ώρα, ενώ μία συνάρτηση μετασχηματισμού καθορίζει το αν μια μονάδα είναι ενεργή (on – ένδειξη 1) ή κλειστή (off – ένδειξη 0). Η ανάλυση του υπολογιστικού αυτού εργαλείου παρατίθεται αναλυτικά παρακάτω.

## 2 Μαθηματικό Μοντέλο

### 2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέραμε, η εξέλιξη της βιομηχανίας οδηγεί σε συνεχώς ανταγωνιστικότερο περιβάλλον το οποίο απαιτεί γρηγορότερα, ακριβέστερα και αποτελεσματικότερα εργαλεία για την κατανομή του προγράμματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Πέρα όμως της απαιτούμενης ζήτησης κάθε κοινωνίας, με τη πάροδο του χρόνου και την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας οι απαιτήσεις των ανθρώπων για ενέργεια αυξάνονται όλο και περισσότερο. Η περίοδος μεταπήδησης από τα συμβατικά οχήματα στα εξολοκλήρου ηλεκτρικά οχήματα έχει ξεκινήσει. Τα ηλεκτρικά οχήματα ακόμα και σήμερα αλλά με την πάροδο του χρόνου διεισδύουν στη ζωή μας με υψηλούς ρυθμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης ενέργειας μέσα σε ένα 24ωρο αλλά και την διαφορετική αντιμετώπιση του τυπικού ΠΔΜ. Εκτός αυτού, τα ορυκτά καύσιμα που μέσω αυτών λειτουργούν οι θερμικές μονάδες για να καλύψουν τις απαιτήσεις ενέργειας, όπως αναφέραμε έχουν λιγοστέψει, για το λόγο αυτό παρουσιάζεται και η διείσδυση των ΑΠΕ για να βοηθήσουν στην κάλυψη ενός ποσού ενέργειας και να αποσυμφορήσουν την λειτουργία των θερμικών μηχανών. Το ΠΔΜ&ΗΟ επιλύεται για 'κεντροποιημένα' συστήματα (centralized power systems) ισχύος με σκοπό τον καθορισμό του πότε η κάθε μονάδα συνδέεται ή αποσυνδέεται από το σύστημα και αντίστοιχα τα ποσά ισχύος που παράγονται κάθε χρονική στιγμή ικανοποιώντας την προκαθορισμένη ζήτηση αλλά και την εξτρά ζήτηση των οχημάτων που υπάρχουν στο σύστημα. Ταυτόχρονα, πρέπει να ικανοποιούνται και οι περιορισμοί που υπάρχουν στο σύστημα, όπως Ισορροπία Ισχύος Συστήματος (System power balance), Στρεφομένη Εφεδρεία (Spinning Reserve), Ελάχιστη Παραγόμενη Ισχύς (Minimum Power Generation), Μέγιστη Παραγόμενη Ισχύς (Maximum Power Generation), Ελάχιστος Χρόνος Λειτουργίας (Minimum uptime), Ελάχιστος Χρόνος Κράτησης (Minimum downtime), Περιορισμοί Κλίσης (Ramp Rates), και για τα ηλεκτρικά οχήματα Περιορισμός Κατάστασης Ισότητας Φόρτισης Μπαταρίας (State Of Charge, soc), Περιορισμός Κατάστασης Ανισότητας Φόρτισης Μπαταρίας και Μέγιστη Δυνατή Ισχύς Προσφοράς Ενέργειας από Σύστημα σε Οχήματα (MaxTransfer). Η προσέγγιση της επίλυσης του ΠΔΜ με τον αλγόριθμο της Διαφορικής Εξέλιξης τα τελευταία χρόνια αποτελεί μια διαδεδομένη λύση η οποία κατέστη συμφέρουσα με την ραγδαία άνοδο της υπολογιστικής δύναμης συστημάτων αλλά και με την ανάπτυξη αποδοτικών επιλυτών. Από την άλλη όμως, η επίλυση του ΠΔΜ&ΗΟ είναι ένα πολύ πρόσφατο πρόβλημα που εμφανίστηκε στην ζωή μας και έχει εφαρμοστεί μόνο με MILP αλγόριθμο από τους Madzharov, Delarue, D'haeseleer (Madzharov D. et al., 2014). Η ιδέα επίλυσης του ΠΔΜ&ΗΟ με Εξελικτικό Αλγόριθμο με Διαφορική Εξέλιξη περιγράφεται για πρώτη φορά σε αυτήν την εργασία και φέρει σημαντικά και πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Με τον συνδυασμό του αλγορίθμου ERC-FROFI μαζί με την φιλοσοφία, την δομή και τους περιορισμούς της εργασίας των Madzharov, Delarue, D'haeseleer παρουσιάζεται η επίλυση του συστήματος για προκαθορισμένο αριθμό μονάδων παραγωγής ισχύος, με μόνο θερμικές μηχανές αλλά και με τη βοήθεια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για μια χρονική περίοδο 24 ωρών.

## 2.2 Συμβολισμός Βασικών Μεγεθών

Πίνακας 2.1: Πίνακας Βασικών Μεγεθών

Σύμβολο	Μονάδες	Περιγραφή Συμβόλου
$N$		Αριθμός μονάδων παραγωγής
$T$	$h$	Αριθμός ωρών της χρονικής περιόδου
$Fes_{max}$		Μέγιστος αριθμός συναρτήσεων που υπολογίζονται
$i$		Δείκτης θερμικής μονάδας
$t$	$h$	Δείκτης ώρας περιόδου
$\alpha_i, b_i, c_i$	$\$/h, \$/MWh, \$/MWh^2$	Συντελεστές κόστους καυσίμου της μονάδας $i$
$P_i^t$	$MW$	Παραγόμενη ισχύς της μονάδας $i$ την ώρα $t$
$P_{max_i}$	$MW$	Μέγιστη ικανότητα παραγωγής ισχύος της μονάδας $i$
$P_{min_i}$	$MW$	Ελάχιστη ικανότητα παραγωγής ισχύος της μονάδας $i$
$u_i^t$	$on=1, off=0$	Κατάσταση της μονάδας $i$ την ώρα $t$
$FC_i$	$\$$	Κόστος καυσίμου της μονάδας $i$
$ST_i^t$	$\$$	Κόστος εκκίνησης της μονάδας $i$ την ώρα $t$
$Sh_i$	$\$$	Κόστος θερμής εκκίνησης της μονάδας $i$
$Sc_i$	$\$$	Κόστος ψυχρής εκκίνησης της μονάδας $i$
$P_D^t$	$MW$	Προβλεπόμενη ζήτηση ισχύος την ώρα $t$
$P_R^t$	$MW$	Στρεφόμενη εφεδρεία την ώρα $t$
$T_{i,on}^t$	$h$	Χρονικό διάστημα λειτουργίας της μονάδας $i$ την ώρα $t$
$T_{i,off}^t$	$h$	Χρονικό διάστημα μη λειτουργίας της μονάδας $i$ την ώρα $t$
$T_{i,up}^t$	$h$	Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της μονάδας $i$
$T_{i,down}^t$	$h$	Ελάχιστος χρόνος μη λειτουργίας της μονάδας $i$
$T_{i,cold}^t$	$h$	Χρονικό διάστημα ψύξης της μονάδας $i$
$RU_i$	$MW/h$	Ρυθμός ανάληψης φορτίου της μονάδας $i$

$RD_i$	$MW/h$	Ρυθμός απόρριψης φορτίου της μονάδας $i$
$E$		Αριθμός κατηγοριών ηλεκτρικών οχημάτων
$e$		Δείκτης κατηγορίας ηλεκτρικών οχημάτων
$EnergyUp_{e,t}$	$MW$	Εξτρά ηλεκτρική ενέργεια για την φόρτιση των ΗΟ της κάθε κατηγορίας $e$ την ώρα $t$
$StartHour$	$h$	Ώρα που όλα τα ΗΟ να είναι πλήρως φορτισμένα
$soC_{e,t}$	$MW$	Κατάσταση φόρτισης των ΗΟ της κατηγορίας $e$ την ώρα $t$
$BatteryFull_e$	$MW$	Πλήρως φορτισμένη μπαταριά των ΗΟ της κατηγορίας $e$
$\eta_{ch}, \eta_{disch}$		Αποδοτικότητα φόρτισης, αποδοτικότητα αποφόρτισης
$ConsumedEnergy_{e,t}$	$MW$	Ισχύς που καταναλώνουν τα ΗΟ της κατηγορίας $e$ την ώρα $t$
$MaxTransfer_{e,t}$	$MW$	Μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί στα ΗΟ της κατηγορίας $e$ την ώρα $t$
$EVsAvailable_{e,t}$		Παρκαρισμένα ΗΟ της κατηγορίας $e$ συνδεδεμένα με το δίκτυο και διαθέσιμα για φόρτιση την ώρα $t$
$ChargeLine$		Περιορισμός από τη γραμμή ισχύος στη μέγιστη ενέργεια που μπορεί να μεταφερθεί σε ένα ΗΟ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το μοντέλο του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αφορά αρχικά μόνο στις θερμικές μονάδες, μη λαμβάνοντας υπόψη το δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς θεωρείται ότι όλες οι μονάδες συνδέονται σε μοναδικό ζυγό και η ζήτηση καλύπτεται από αυτόν όπως παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.1: Συμβατικό μοντέλο συστήματος παραγωγής ενέργειας

Ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα μεγάλης κλίμακας. Σε αυτό περιέχονται συνεχείς και διακριτές μεταβλητές και ένα πλήθος περιορισμών, ανισότητας και ισότητας, γραμμικών και μη, εξαρτώμενων ή όχι από το χρόνο. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ανάγεται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης κόστους με ταυτόχρονη ικανοποίηση των περιορισμών.

## 2.3 Μαθηματική Μοντελοποίηση Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων

### 2.3.1 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αντιπροσωπεύει το συνολικό λειτουργικό κόστος του συστήματος, το οποίο αποτελείται από το κόστος καυσίμου και τον κόστος θερμής/ ψυχρής εκκίνησης των μονάδων.

Για την εισαγωγή του κόστους καυσίμου, χρησιμοποιείται μία τετραγωνική συνάρτηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος  $P_i^t$  και δίδεται από το τριώνυμο:

$$FC_i(P_i^t) = a_i + b_i \cdot P_i^t + c_i \cdot (P_i^t)^2 \quad (2.1)$$

όπου  $a_i, b_i, c_i$  είναι οι συντελεστές της τετραγωνικής συνάρτησης της μονάδας  $i$ .

Το κόστος εκκίνησης εξαρτάται από τον χρόνο για τον οποίο η μονάδα  $i$  είναι εκτός λειτουργίας, πριν από την ώρα  $t$ , όταν αρχίζει να παράγει ενέργεια. Δηλαδή, όταν η μονάδα είναι εκτός λειτουργίας για μεγάλο διάστημα τότε κατά την εκκίνησή της να εισάγεται στην αντικειμενική κόστος ψυχρής εκκίνησης, ενώ όταν η μονάδα είναι εκτός λειτουργίας για μικρό χρονικό διάστημα τότε κατά την εκκίνησή της να εισάγεται στην αντικειμενική κόστος θερμής εκκίνησης.

Χρησιμοποιείται λοιπόν σχήμα βηματικής συνάρτησης που περιγράφεται από την εξίσωση:



$$ST_i^t = \begin{cases} S_{h,i}, & \text{if } T_{i,down} \leq T_{i,off}^t \leq T_{i,down} + T_{i,cold} \\ S_{c,i}, & \text{if } T_{i,down} + T_{i,cold} \leq T_{i,off}^t \end{cases} \quad (2.2)$$

όπου,  $T_{i,off}^t$  είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο η μονάδα  $i$  ήταν συνεχώς κλειστή:

$$T_{i,off}^t = \begin{cases} 0, & \text{if } u_i^t = 1 \\ 1 + T_{i,off}^{t-1}, & \text{if } u_i^t = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Η βέλτιστη λύση για το UCP είναι το πρόγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος (TOC). Η παρακάτω σχέση είναι το άθροισμα του καυσίμου και το κόστος έναρξης κάθε μονάδας στον ορίζοντα προγραμματισμού:

$$\underset{P_i^t, u_i^t}{\text{minimize}} OC = \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^N [FC(P_i^t) + ST_i^t \cdot (1 - u_i^{t-1})] \cdot u_i^t \quad (2.4)$$

όπου,

$t$  είναι η κάθε ώρα του διαστήματος που εξετάζεται.

$N$  είναι το πλήθος των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.

## 2.3.2 Περιορισμοί Προβλήματος

### 2.3.2.1 Περιορισμός Ισοζυγίου Ισχύος

Ο θεμελιώδης περιορισμός ισοζυγίου ισχύος αναφέρεται στην ικανοποίηση της ζήτησης προκαθορισμένης ισχύος για κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος και του άθροισματος της εξτρά ισχύος κάθε κατηγορίας ΗΟ που χρειάζονται για να φορτιστούν για κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος. Βάσει λοιπόν αυτού, η συνολική παραγόμενη ισχύς σε κάθε ώρα κατανομής, θα πρέπει να ισούται με το φορτίο της συγκεκριμένης ώρας:

$$\sum_{i=1}^N u_i^t \cdot P_i^t = P_D^t + \sum_{e=1}^E EnergyUp_{e,t} , \quad \forall t \quad (2.5)$$

### 2.3.2.2 Περιορισμός απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας

#### Κατάσχεση Περιορισμού στρεφόμενης εφεδρείας στο πρόβλημα

Η στρεφόμενη εφεδρεία καθορίζεται ως ένα ποσοστό της ζήτησης για κάθε ώρα του διαστήματος που μελετάται. Έτσι ο περιορισμός στρεφόμενης εφεδρείας λαμβάνει τη μορφή:

$$\sum_{i=1}^N u_i^t \cdot P_{i,max} \geq P_D^t + P_R^t + \sum_{e=1}^E EnergyUp_{e,t} , \quad \forall t \quad (2.6)$$

Ο περιορισμός αυτός αναφέρεται στο γεγονός ότι κάθε ώρα, το άθροισμα της μέγιστης ισχύος των μονάδων που είναι εν ενεργεία, οφείλει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το άθροισμα της προκαθορισμένης ζήτησης ισχύος, συν ενός ποσοστού 10% αυτής, συν την ζήτηση κάθε κατηγορίας ΗΟ, για κάθε ώρα. (Madzharov D. et al., 2014)

### 2.3.2.3 Περιορισμός ορίων παραγωγής κάθε μονάδας (ramp rates)

Λόγω των τεχνικών χαρακτηριστικών κάθε μονάδας και των περιορισμών θερμικής καταπόνησης, κάθε δεσμευμένη μονάδα μπορεί να αυξομειώσει την παραγωγή της μεταξύ δύο διαδοχικών ωρών εντός ενός εύρους, το οποίο καθορίζεται από τους ρυθμούς κλίσης της μονάδας. Έτσι, τα όρια παραγωγής της μονάδας  $i$ , που είναι σε λειτουργία στην ώρα  $t$  ( $u_i^t = 1$ ), καθορίζονται ως εξής:

$$P_{i,min}^t \leq P_i^t \leq P_{i,max}^t \quad (2.7)$$

Όπου

$$P_{i,min}^t = \begin{cases} P_{i,min}, & \text{if } u_i^{t-1} = 0 \\ \max(P_{i,min}, P_i^{t-1} - RD_i), & \text{if } u_i^{t-1} = 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

Και

$$P_{i,max}^t = \begin{cases} P_{i,max}, & \text{if } u_i^{t-1} = 0 \\ \min(P_{i,max}, P_i^{t-1} + RU_i), & \text{if } u_i^{t-1} = 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

### 2.3.2.4 Περιορισμός ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδων

Όταν μια μονάδα αρχίζει να παράγει ενέργεια, θα πρέπει να παραμείνει δεσμευμένη για έναν ελάχιστο αριθμό διαδοχικών ωρών, με βάση τον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας ( $T_{i,up}$ ):

$$T_{i,on}^t \geq T_{i,up} \quad (2.10)$$

όπου  $T_{i,on}^t$  υποδηλώνει το χρονικό διάστημα για το οποίο η μονάδα  $i$  λειτουργεί μέχρι την ώρα  $t$ . Υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{i,on}^t = \begin{cases} 0, & \text{if } u_i^t = 0 \\ 1 + T_{i,on}^{t-1}, & \text{if } u_i^t = 1 \end{cases}$$

(2.11)

Ομοίως, μόλις αποδεσμευθεί η μονάδα  $i$ , δεν θα πρέπει να δεσμευτεί εκ νέου για ορισμένο αριθμό ωρών που καθορίζονται από το  $T_{i,down}$ :

$$T_{i,off}^t \geq T_{i,down}$$

(2.12)

όπου το  $T_{i,off}^t$  υπολογίζεται από την εξίσωση (2.3). Για  $T_{i,off}^{t=1}$  και  $T_{i,on}^{t=1}$  η αρχική κατάσταση της μονάδας  $i$  λαμβάνεται υπόψιν.

### 2.3.2.5 Περιορισμοί κατάστασης φόρτισης μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων

Στο ΠΔΜ&ΗΟ υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί που αφορούν την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας των οχημάτων. Για τον υπολογισμό της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (state of charge, soc), χρησιμοποιούμε την παρακάτω φόρμουλα:

$$soc_{e,t} = soc_{e,t-1} + \eta_{ch} \cdot EnergyUp_{e,t} - \frac{1}{\eta_{disch}} \cdot ConsumedEnergy_{e,t} \quad \forall e, t$$

(2.11)

Όλα τα οχήματα από κάθε κατηγορία  $e$  πρέπει να είναι πλήρως φορτισμένα μια καθορισμένη ώρα StartHour, δηλαδή η μεταβλητή soc πρέπει να έχει μέγιστη τιμή για μια συγκεκριμένη ώρα που τίθεται από τον χρήστη. Στη παρούσα εργασία οι προσομοιώσεις εκτελούνται με StartHour = 5.00 h.

Το ενεργειακό απόθεμα της μπαταρίας και οι περιορισμοί στη φόρτιση της αναφέρονται παρακάτω:

1. Το άθροισμα ισχύος της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας κάθε κατηγορίας οχημάτων την προηγούμενη ώρα με την ισχύς που προσφέρεται στα οχήματα από το σύστημα κάθε κατηγορίας την τωρινή στιγμή(ώρα) πολλαπλασιασμένη με την αποδοτικότητα της μπαταρίας κατά την φόρτιση, να μην ξεπερνά την μέγιστη ποσότητα ισχύος των οχημάτων από κάθε κατηγορία. Με μαθηματικό τύπο αναγράφεται ως εξής:

$$soc_{e,t-1} + \eta_{ch} \cdot EnergyUp_{e,t} \leq BatteryFull_e, \quad \forall t, e$$

(2.12)

2. Η ισχύς που προσφέρει το σύστημα στα οχήματα κάθε κατηγορίας για κάθε ώρα να μην ξεπερνά την προβλεπόμενη μέγιστη ισχύς που μπορεί να προσφέρει το σύστημα στα οχήματα κάθε κατηγορίας κάθε ώρα. Με μαθηματικό τύπο αναγράφεται ως εξής:

$$EnergyUp_{e,t} \leq MaxTransfer_{e,t}, \forall t, e \quad (2.13)$$

οπού η τιμή του  $MaxTransfer$  δίνεται άμα πολλαπλασιάσουμε τα οχήματα της κάθε κατηγορίας κάθε ώρα που είναι παρκαρισμένα και έτοιμα για φόρτιση, με τη μέγιστη τιμή ισχύος που μπορεί να προσφερθεί σε ένα όχημα. Με μαθηματικό τύπο αναγράφεται ως εξής:

$$MaxTransfer_{e,t} = EVsAvailable_{e,t} \cdot ChargeLine, \forall t, e \quad (2.14)$$

## 2.4 Μαθηματική Μοντελοποίηση Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Το Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ακολουθεί τη λογική του Κεφαλαίου 2.3, με την βασική διαφορά ότι η κάλυψη μέρους της ζήτησης ενέργειας γίνεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Το χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι ότι η ενέργεια που παράγουν χρησιμοποιείται άμεσα στο σύστημα και οι θερμικές 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 τη συνηθισμένη στοχαστική προσέγγιση σεναρίων που προκύπτουν από μετρήσεις στη ζητούμενη περιοχή. Η μελέτη εντάσσεται στην περίπτωση χαμηλού υπολειπομένου φορτίου (low residual load case) που καλούνται να καλύψουν οι θερμικές μονάδες. Σύμφωνα με την εργασία του E. Delague και των συνεργατών του (Delague E. et al., 2013) αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα. Παρακάτω παρουσιάζεται ο συμβολισμός των βασικών μεγεθών του μοντέλου.

Πίνακας 2.2: Πίνακας Βασικών Μεγεθών

Σύμβολο	Μονάδες	Περιγραφή Συμβόλου
$\underline{D}$	MW	Ελάχιστη τιμή της συνολικής ζήτησης $D_t$
$FD$		Συντελεστής βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ
$nt$		Συνολικός αριθμός περιόδων
$LD_t$	MW	Χαμηλή υπολειπομένη ζήτηση (Low residual demand)

Η μαθηματική φόρμουλα που ορίζει την υπολειπομένη ζήτηση είναι η εξής:

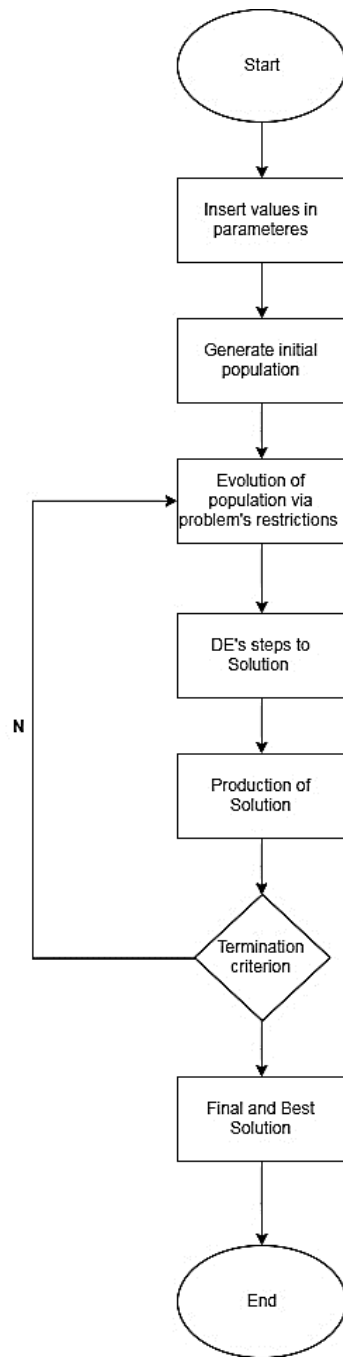
$$LD_t = D_t - FD \cdot \underline{D} \cdot \sin\left(\frac{(j-1) \cdot \pi}{nt-1}\right), \quad \forall t \quad (2.15)$$

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε χρονική στιγμή αφαιρείται από συνολική ζήτηση ο ημιτονικός όρος που εκφράζει την ζήτηση που καλύπτουν οι ΑΠΕ. Ο παράγοντας  $FD$  λειτουργεί αναλογικά ως συντελεστής βαρύτητας της διείσδυσης των ΑΠΕ, για μηδενική τιμή του τότε ολόκληρο το φορτίο καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες και όσο αυξάνεται καταλήγουμε σε περίπτωση χαμηλής υπολειπομένης ζήτησης (Low residual case). Ο γενικός ημιτονικός όρος, όπως είναι προφανές, προκύπτει μηδενικός στην αρχή και το τέλος της χρονικής περιόδου και αποκτά τη μέγιστη τιμή του για την μέση περίοδο.

## 3 Υπολογιστικό Μοντέλο

### 3.1 Εισαγωγή

Ο προγραμματισμός του προβλήματος υλοποιήθηκε σε υπολογιστικό περιβάλλον Matlab, το οποίο καθιστά εύκολη την άμεση και ταχεία ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Όπως προκύπτει από τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, ο προγραμματισμός των περιορισμών, η εισαγωγή των διαδικασιών του FROFI, καθώς και η ενσωμάτωση των περιορισμών που αφορούν τα ηλεκτρικά οχήματα απαιτούν στην δημιουργία υπορουτίνων – υποπρογραμμάτων για την υλοποίηση αυτών. Στον κεφάλαιο λοιπόν αυτό, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας προγραμματισμού του προβλήματος, καθώς και ανάλυση του ευρετικού μηχανισμού που αναπτύχθηκε για την αναζήτηση των υποψήφιων λύσεων σε εφικτές περιοχές του πεδίου τιμών. Παρακάτω φαίνεται στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος ώστε να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής υπολογιστικής συλλογιστικής πορείας

### 3.2 Εισαγωγή δεδομένων συστήματος

Αρχικά, δίνεται από τον χρήστη το πλήθος των μονάδων του συστήματος που θα εξεταστούν στο πρόβλημα και από ένα αρχείο εισόδου εισάγεται αυτόματα ένας πίνακας με τα μεγέθη απαραίτητα για στο σύστημα. Επίσης, εισάγονται αυτόματα άλλοι τρεις πίνακες που αφορούν τα ηλεκτρικά οχήματα, ο ένας περιέχει τις τιμές της σταθεράς  $MaxTransfer_{e,t}$ , ο επόμενος τις τιμές της σταθεράς  $ConsumedEnergy_{e,t}$  και ο τελευταίος με τις τιμές της σταθεράς  $BatteryFull_{e,t}$ . Τα προηγούμενα μεγέθη θα



αναλυθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο για το πώς υπολογίστηκαν. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων ενός συστήματος που αποτελείται από 10 συμβατικές (θερμικές) μονάδες. Το σύστημα αυτό είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστήματα στη σχετική βιβλιογραφία και για αυτό επιλέχθηκε να μελετηθεί στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 3.1: Πίνακας αριθμητικών τιμών παραμέτρων συστήματος

a/a	Pmax (MW)	Pmin (MW)	a (\$/h)	b (\$/MWh)	c (\$/MWh <sup>2</sup> )	Tup (h)	Tdn (h)	SH (\$)	SC (\$)	Tcold (h)	In.st. (h)
1	455	150	1000	16,19	0,00048	8	8	4500	9000	5	8
2	455	150	970	17,26	0,00031	8	8	5000	10000	5	8
3	130	20	700	16,6	0,002	5	5	550	1100	4	-5
4	130	20	680	16,5	0,00211	5	5	560	1120	4	-5
5	162	25	450	19,7	0,00398	6	6	900	1800	4	-6
6	80	20	370	22,26	0,00712	3	3	170	340	2	-3
7	85	25	480	27,74	0,00079	3	3	260	520	2	-3
8	55	10	660	25,92	0,00413	1	1	30	60	0	-1
9	55	10	665	27,27	0,00222	1	1	30	60	0	-1
10	55	10	670	27,79	0,00173	1	1	30	60	0	-1

Πίνακας 3.2: Προβλεπόμενη ζήτηση φορτίου

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

### 3.2.1 Ανάλυση και Εισαγωγή Δεδομένων για Ηλεκτρικά οχήματα

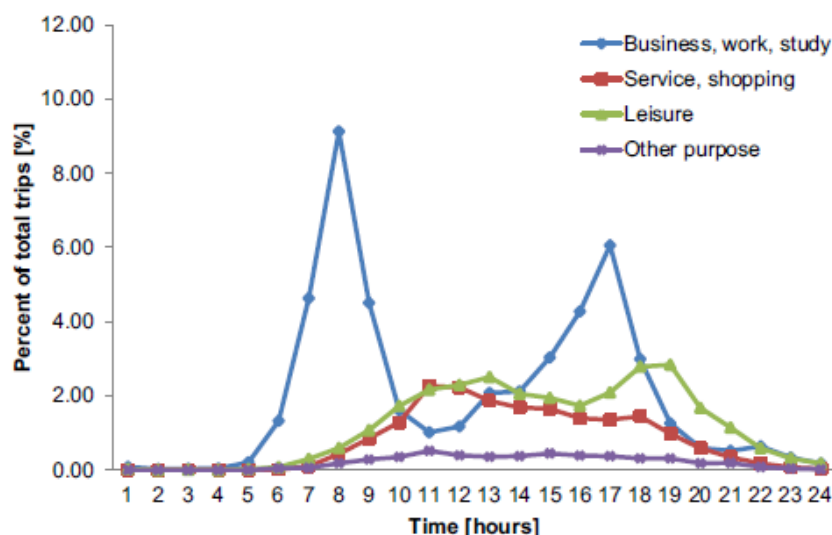
Για την επιλογή των κατάλληλων δεδομένων για την επίλυση του ΠΔΜ&ΗΟ χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία η μέθοδος και λογική από την προσέγγιση των Madzharov, Delarue, D'haeseleer (Madzharov D. et al., 2014) που έλυσαν το πρόβλημα με τον αλγόριθμο MILP. Ο κύριος στόχος του μοντέλου είναι η αναπαραγωγή ρεαλιστικών σεναρίων και η διεξαγωγή προσομοιώσεων με βάση τα αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα. Επομένως, ένα ουσιαστικό μέρος του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ο χειρισμός των στατιστικών δεδομένων για τα μήκη ταξιδιού και τους χρόνους εκκίνησης καθόλη τη διάρκεια της ημέρας.

Το κύριο ζητούμενο είναι το σύστημα να διασφαλίζει ότι όλα τα οχήματα θα επαναφορτιστούν πριν από τα πρώτα ταξίδια το πρωί της επόμενης μέρας. Όλες οι παράμετροι που αφορούν τα οχήματα συνοψίζονται στον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Παράμετροι ΗΟ για την εργασία

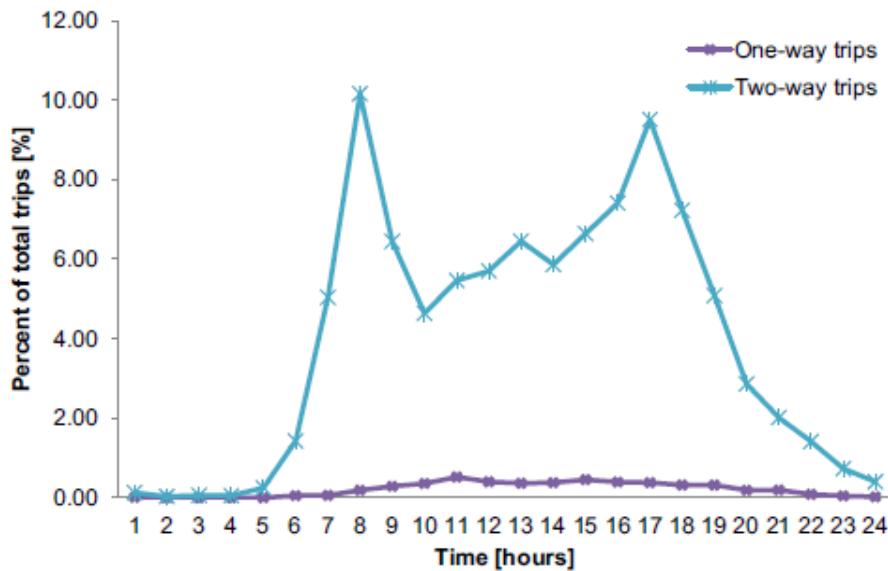
<b>Τύπος ΗΟ</b>	Πλήρως ηλεκτρικά
<b>Χωρητικότητα Μπαταρίας οχήματος</b>	35 kWh
<b>Κατανάλωση</b>	0.175 kWh/km
<b>Γραμμή Ρεύματος</b>	3 kW και 6 kW (για τα οχήματα που εκτελούν μεγάλα ταξίδια και επιστρέφουν βραδινές ώρες π.χ. 22.00 – 23.00)
<b>Απόδοση κύκλου φόρτισης / εκφόρτωσης</b>	86%

Η βασική ιδέα για την συλλογή των δεδομένων έγινε από εκτενή ανάλυση του Σουηδικού Ινστιτούτου Μεταφορών και Επικοινωνιών Ανάλυσης σχετικά με τις μετακινήσεις μοτίβα των Σουηδών κατοίκων που χρησιμοποιούν διαφορετικά μέσα μεταφοράς. Τα στοιχεία αναφέρονται για την περίοδο ενός έτους που κυμαίνεται από 01/10/2005 έως 30/09/2006, συνοψίζοντας τις πληροφορίες για περίπου 5 δισεκατομμύρια ταξίδια, που αντιστοιχούν σε 13,4 εκατομμύρια ταξίδια ημερησίως, ενώ ο πιο συνηθισμένος τρόπος ταξιδιού είναι το αυτοκίνητο. Το σχήμα 3.2 δείχνει την κατανομή των χρόνων έναρξης του ταξιδιού σε μια τυπική ημέρα, εκφρασμένη σε ποσοστό όλων των ταξιδιών.



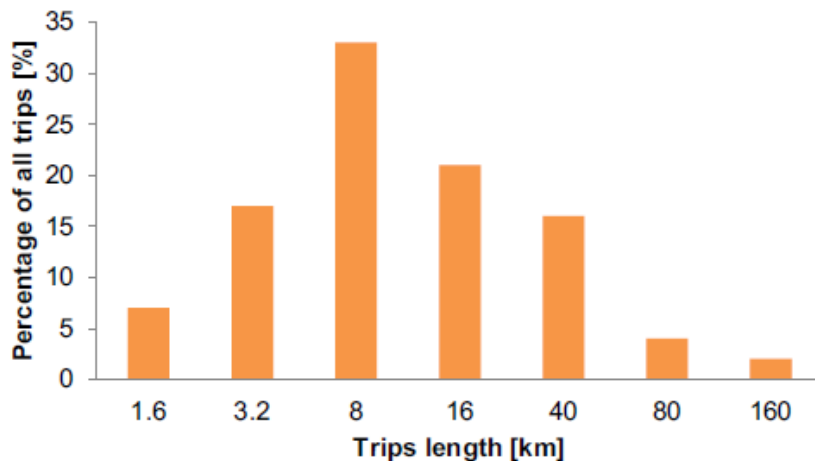
Σχήμα 3.2: Ωρα εκκίνησης διαφορετικών τύπων ταξιδιών σε περίοδο 24 ωρών (Madzharov D. et al., 2014)

Τα ταξίδια χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον λόγο του ταξιδιού (1) επιχειρηματικές δραστηριότητες, εργασία και μελέτη, (2) εξυπηρέτηση και αγορές, (3) αναψυχή και (4) άλλος σκοπός. Παρόλο που αυτή η κατανομή είναι αντιπροσωπευτική για όλα τα μεταφορικά μέσα, στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι ισχύει και για τα αυτοκίνητα. Οι δύο κορυφές που σχηματίστηκαν κατά την κατανομή των ταξιδιών των τριών πρώτων ομάδων σημαίνουν ότι, συνήθως, οι άνθρωποι ολοκληρώνουν δύο ταξίδια την ημέρα (να πάνε και να επιστρέψουν). Για παράδειγμα, η ομάδα 'επιχειρηματικές δραστηριότητες, εργασίας και μελέτης' παρουσιάζει δύο κορυφές γύρω στις 08:00 το πρωί και στις 17:00 το απόγευμα, αντίστοιχα, όταν οι άνθρωποι φεύγουν από σημείο εκκίνησης τους το πρωί και ταξιδεύουν πίσω σε αυτό. Τα ταξίδια από τις ομάδες (1), (2) και (3) συγκεντρώνονται και αντιπροσωπεύουν όλα τα αμφίδρομα ταξίδια που ολοκληρώθηκαν σε περίοδο 24 ωρών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Τα μισά ταξίδια έχουν ξεκινήσει ως στις 14:00, δηλαδή όλοι οι άνθρωποι έχουν εγκαταλείψει το σημείο εκκίνησης για το πρώτο ταξίδι τους στον τελικό προορισμό (δηλαδή, το πρώτο μέρος ενός ταξιδιού επιστροφής ξεκίνησε πριν τις 14:00). Τα ταξίδια από την ομάδα (4) "άλλος σκοπός" θεωρείται ότι είναι μόνο μονόδρομα ταξίδια, πράγμα που σημαίνει ότι οι άνθρωποι από αυτή την ομάδα ολοκληρώνουν μόνο ένα ταξίδι σε περίοδο 24 ωρών. Συνολικά, το 5% όλων των ταξιδιών είναι ταξίδια μονόδρομα και το 95% είναι ταξίδια αμφίδρομα.



Σχήμα 3.3: Ο χρόνος έναρξης των μονόδρομων και αμφίδρομων ταξιδιών σε περίοδο 24 ωρών (η καμπύλη αμφίδρομων ταξιδιών είναι το άθροισμα των τριών πρώτων προφίλ του σχήματος 3.2) (Madzharov D. et al., 2014)

Η ακριβής κατανομή των ημερήσιων μετακινήσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4, όπως αναφέρει το Βρετανικό Υπουργείο Μεταφορών. (Madzharov D. et al., 2014)



Σχήμα 3.4: Κατανομή των αποστάσεων των ταξιδιών (UK Department for Transport(DfT), 2009)

Στις περισσότερες χώρες της Δυτικής Ευρώπης (π.χ. Αυστρία, Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία, Ισπανία, Ελβετία) η ετήσια παραγωγή ηλεκτρισμού ανά κάτοικο κυμαίνεται περίπου στις 7000 και 9000 kWh. Στην παρούσα εργασία, υποθέτουμε μια μέση κατανάλωση 8500 kWh / κάτοικο, αυτό ισοδυναμεί με μια μέση ετήσια στάθμη ισχύος περίπου 1 kW / κάτοικο. Επομένως, το σύστημα αναφοράς μπορεί να εξυπηρετήσει

περίπου 1,66 εκατομμύρια άτομα. Υποθέσαμε ένα μέσο συντελεστή οχημάτων ανά κάτοικο 0,45 οχήματα / κάτοικο. Χρησιμοποιώντας 0,45 οχήματα / κάτοικο για το σύστημά μας οδηγούμαστε σε επίπεδα διείσδυσης ΗΟ όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 3.4.

*Πίνακας 3.4: Επίπεδα διείσδυσης ΗΟ (σε %) με τον αντίστοιχο αριθμό ΗΟ που χρησιμοποιείται στο μοντέλο, για 1,66 εκατομμύρια άτομα και 0,45 οχήματα / κάτοικο.*

Διείσδυση ΗΟ	Πλήθος ΗΟ
0%	0
20%	149.400
50%	373.500
80%	597.600
100%	747.000

Ο Πίνακας 3.5 δείχνει τον τύπο ταξιδιού, το μήκος και τη μέση ταχύτητα που χρησιμοποιείται στην εργασία. Η μέση ταχύτητα οδήγησης προσαρμόστηκε από μια σύνοψη της μέσης ταχύτητας οδήγησης στην Ευρώπη. Η μελέτη χωρίζει τους τύπους ταξιδιών σύμφωνα με τους δρόμους και τις τυπικές περιοχές όπου ολοκληρώνονται οι εκδρομές.

*Πίνακας 3.5: Μέση ταχύτητα οχημάτων ανάλογα το τύπο ταξιδιού και την απόσταση*

Τύπος Ταξιδιού	Απόσταση Ταξιδιού (km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)
Αστικοί δρόμοι	1,6	26
Αστικοί δρόμοι	3,2	26
Αστικοί δρόμοι	8	26
Αστικοί δρόμοι	16	26
Δευτερογενείς δρόμοι	40	44
Κεντρικοί δρόμοι	80	86
Αυτοκινητόδρομοι	160	115

Δεδομένου ότι το μοντέλο για την προετοιμασία των δεδομένων μπορεί να είναι πολύ ευμετάβλητο και να χρησιμοποιείται σε διαφορετικά σενάρια και μοντέλα, περιγράφεται λεπτομερώς σε αυτή την ενότητα. Ο στόχος είναι ο υπολογισμός του συνολικού αριθμού ΗΟ σε ένα δεδομένο σύστημα, μαζί με την κατανομή του αριθμού των ΗΟ στο δρόμο με το αντίστοιχο μήκος ταξιδιού σε περίοδο 24 ωρών, με βάση τις κατανομές

των σχημάτων 3.3 και 3.4. Το σχήμα 3.3 δείχνει τον χρόνο έναρξης των ταξιδιών ενός και δύο δρόμων σε μια περίοδο 24 ωρών, εκφρασμένη σε ποσοστό όλων των ταξιδιών. Υπάρχει ένας πολύ μικρός αριθμός ταξιδιών κατά τη διάρκεια της νύχτας από τις 23:00 έως τις 05:00, επομένως στην τρέχουσα εργασία υποτίθεται ότι δεν ξεκινούν ταξίδια σε αυτή την περίοδο. Όλα τα ΗΟ πρέπει να επαναφορτιστούν μέχρι τις 06:00, όταν τα πρώτα οχήματα είναι και πάλι στο δρόμο. Το σχήμα 3.4 παρουσιάζει την κατανομή των αποστάσεων ταξιδιών, όπως θα χρησιμοποιηθεί περαιτέρω σε αυτή την εργασία.

Το πρώτο βήμα είναι να συγκεντρωθεί η κατανομή των ταξιδιών σε περίοδο 24 ωρών. Μια διευκρίνιση σχετικά με τους όρους μονόδρομων και αμφίδρομων ταξιδιών γίνεται εδώ. Ένα ΗΟ από την ομάδα ταξιδιών μονής κατεύθυνσης ταξιδεύει για παράδειγμα 80 χιλιόμετρα, ταυτόχρονα. Ωστόσο, ένα ΗΟ από την ομάδα αμφίδρομων ταξιδιών καλύπτει 80 χιλιόμετρα με δύο ταξίδια, κάθε 40 χιλιόμετρα.

Η μόνη παράμετρος εισαγωγής που απαιτείται για τον υπολογισμό του αριθμού των εκδρομών που ξεκινούν κάθε ώρα για κάθε μήκος ταξιδιού είναι ο συνολικός αριθμός ΗΟ στο σύστημα, υποθέτοντας ένα επίπεδο διείσδυσης 100% -  $EV_{P100\%}$ . Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στη συνέχεια παράγει δεδομένα και για χαμηλότερα επίπεδα διείσδυσης. Για τους υπολογισμούς υποθέτουμε ότι κάθε όχημα στο σύστημα κάνει ένα ταξίδι την ημέρα, το οποίο μπορεί να είναι μονόδρομο ή αμφίδρομο.

Ο συνολικός αριθμός των ΗΟ στο σύστημα  $EV_{P100\%}$  είναι ίσος με το άθροισμα του πλήθους των ΗΟ που εκτελούν μονόδρομο ταξίδι -  $EV_{one}$  και αμφίδρομο ταξίδι -  $EV_{two}$  το 24ωρο.

$$EV_{P100\%} = EV_{one} + EV_{two} \quad (3.1)$$

Ο αριθμός των ΗΟ μονόδρομου ταξιδιού είναι ίσος με το αριθμός ολοκληρωμένων ταξιδιών  $Trips_{one}$ :

$$Trips_{one} = EV_{one} \quad (3.2)$$

Ο αριθμός των ταξιδιών στην ομάδα αμφίδρομων ταξιδιών  $Trips_{two}$  είναι διπλάσιος από τον αριθμό των ΗΟ που πραγματοποιούν δύο ταξίδια:

$$Trips_{two} = 2 \cdot EV_{two} \quad (3.3)$$

Ο συνολικός αριθμός ταξιδιών  $Trips_{tot}$  είναι ίσος με το άθροισμα των ταξιδιών από τις δυο κατηγορίες μας:

$$Trips_{tot} = Trips_{two} + Trips_{one} \quad (3.4)$$

Στη συνέχεια, ο συνολικός αριθμός ταξιδιών της κατηγορίας μονόδρομων ταξιδιών μπορεί να εκφραστεί με όρους συνολικών ταξιδιών καθ' όλη την ημέρα μέσω της παραμέτρου  $factor_{one-tot}$ . Από τα δεδομένα διανομής στο σχήμα 3.3 μπορεί να συμπεράνει ότι ο συνολικός αριθμός ταξιδιών στην ομάδα μονής κατεύθυνσης είναι 5% του συνόλου όλων των ταξιδιών σε περίοδο 24 ωρών ( $factor_{one-tot} = 5\%$ ):

$$Trips_{one} = factor_{one-tot} \cdot Trips_{tot} \quad (3.5)$$

Οπότε άμα αντικαταστήσουμε τις εξισώσεις 3.1 – 3.4 στην 3.5, ο αριθμός των ΗΟ που εκτελούν μονόδρομα ταξίδια μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$EV_{one} = factor_{one-tot} \cdot (2 \cdot EV_{two} + EV_{one}) \quad (3.6)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.1 και 3.6 υπολογίζονται οι  $EV_{one}$  και  $EV_{two}$ , το ίδιο και η  $Trips_{tot}$  από τις εξισώσεις 3.2 – 3.4.

Αφού υπολογίσουμε την  $Trips_{tot}$ , μαζί με τις κατανομές που συνοψίζονται στα σχήμα 3.3 και 3.4 υπολογίζουμε τον αριθμό των ταξιδιών που ξεκινούν κάθε ώρα. Καθώς τα μοτίβα οδήγησης και η κατανάλωση ενέργειας των ΗΥ που καλύπτουν τα μήκη ταξιδιού που αναφέρονται στον Πίνακα 3.4 είναι διαφορετικά, τα ΗΟ στο σύστημα χωρίζονται σε επτά ξεχωριστές κατηγορίες σύμφωνα με αυτά τα μήκη ταξιδιού. Κατά συνέπεια, το σύνολο των ΗΟ μπορεί να εκφραστεί ως:

- $E$ : σύνολο όλων των ΗΟ, οι 7 κατηγορίες που διακρίνουμε τα οχήματα  $e$  που διανύουν την ίδια απόσταση  $e \in E = \{1, 2, \dots, 7\}$ .

Γνωρίζοντας το ποσοστό όλων των ταξιδιών  $Trips_{tot}$  για τα αναφερόμενα μήκη ταξιδιού (Πίνακας 3.4), ο αριθμός των ταξιδιών που ξεκινούν κάθε ώρα υπολογίζεται για κάθε ομάδα  $e$ . Αυτό επιτρέπει τον προσδιορισμό του αριθμού κάθε κατηγορίας  $e$  των σταθμευμένων ΗΟ συνδεδεμένων στο δίκτυο και διαθέσιμων για φόρτιση κάθε ώρα  $t$  και την αντίστοιχη χωρητικότητα της μπαταρίας  $EVsAvailable_{e,t}$ . Επίσης, υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται για κάθε κατηγορία κατά τη διάρκεια των ταξιδιών κατά τη διάρκεια της ημέρας  $ConsumedEnergy_{e,t}$ . Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται στη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού των σταθμών παραγωγής ενέργειας.

Παρακάτω παρατίθενται τα δεδομένα που αφορούν τα ΗΟ και οι τιμές τους για 100% διείσδυση στο σύστημα.

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικών Οχημάτων για 100% διείσδυση

EVs		
EVs_one	=	71143
EVs_two	=	675857
EVs_tot	=	747000

Trips		
e1	=	99600
e2	=	234771
e3	=	462428
e4	=	298800
e5	=	227657
e6	=	64029
e7	=	35572
Trips_tot	=	1422857

e1		e2		e3	
Trips_one	Trips_two	Trips_one	Trips_two	Trips_one	Trips_two
4980	94620	11739	223032	23121	439307
EVs		EVs		EVs	
52290		123255		242775	
e4		e5		e6	
Trips_one	Trips_two	Trips_one	Trips_two	Trips_one	Trips_two
14940	283860	11383	216274	3201	60828
EVs		EVs		EVs	
156870		119520		33615	
e7					
Trips_one	Trips_two				
1779	33793				
EVs					
18675					



<b>Trips_Percentage</b>		
<b>Hour</b>	<b>Trips_one</b>	<b>Trips_two</b>
Hour1	0,00%	0,00%
Hour2	0,00%	0,00%
Hour3	0,00%	0,00%
Hour4	0,00%	0,00%
Hour5	0,00%	0,00%
Hour6	0,00%	1,50%
Hour7	0,00%	5,00%
Hour8	0,10%	10,00%
Hour9	0,20%	6,50%
Hour10	0,30%	4,50%
Hour11	0,70%	5,50%
Hour12	0,50%	5,50%
Hour13	0,30%	6,00%
Hour14	0,40%	5,50%
Hour15	0,60%	6,50%
Hour16	0,40%	7,50%
Hour17	0,40%	9,50%
Hour18	0,30%	7,50%
Hour19	0,40%	5,00%
Hour20	0,10%	3,00%
Hour21	0,30%	2,50%
Hour22	0,00%	2,00%
Hour23	0,00%	1,50%
Hour24	0,00%	0,00%

e1						e2							
Hour	Trips		EVs_Available	Percentage Available	EVs_Trip	Consumed_Energy(MWh)	Hour	Trips		EVs_Available	Percentage Available	EVs_Trip	Consumed_Energy(MWh)
	Trip_one	Trip_two						Trip_one	Trip_two				
Hour1	0	0	52290	100%	0	0,000	Hour1	0	0	123255	100%	0	0,000
Hour2	0	0	52290	100%	0	0,000	Hour2	0	0	123255	100%	0	0,000
Hour3	0	0	52290	100%	0	0,000	Hour3	0	0	123255	100%	0	0,000
Hour4	0	0	52290	100%	0	0,000	Hour4	0	0	123255	100%	0	0,000
Hour5	0	0	52290	100%	0	0,000	Hour5	0	0	123255	100%	0	0,000
Hour6	0	1494	51543	99%	747	0,209	Hour6	0	3522	121494	99%	1761	0,986
Hour7	0	4980	49800	95%	2490	0,697	Hour7	0	11739	117386	95%	5869	3,287
Hour8	100	9960	47210	90%	5080	1,422	Hour8	235	23477	111281	90%	11973	6,705
Hour9	199	6474	48854	93%	3436	0,962	Hour9	470	15260	115155	93%	8100	4,536
Hour10	299	4482	49750	95%	2540	0,711	Hour10	704	10565	117268	95%	5987	3,353
Hour11	697	5478	48854	93%	3436	0,962	Hour11	1643	12912	115155	93%	8100	4,536
Hour12	498	5478	49053	94%	3237	0,906	Hour12	1174	12912	115625	94%	7630	4,273
Hour13	299	5976	49003	94%	3287	0,920	Hour13	704	14086	115507	94%	7747	4,339
Hour14	398	5478	49153	94%	3137	0,878	Hour14	939	12912	115859	94%	7395	4,141
Hour15	598	6474	48455	93%	3835	1,074	Hour15	1409	15260	114216	93%	9039	5,062
Hour16	398	7470	48157	92%	4133	1,157	Hour16	939	17608	113512	92%	9743	5,456
Hour17	398	9462	47161	90%	5129	1,436	Hour17	939	22303	111164	90%	12091	6,771
Hour18	299	7470	48256	92%	4034	1,129	Hour18	704	17608	113747	92%	9508	5,325
Hour19	398	4980	49402	94%	2888	0,809	Hour19	939	11739	116446	94%	6808	3,813
Hour20	100	2988	50696	97%	1594	0,446	Hour20	235	7043	119498	97%	3756	2,104
Hour21	299	2490	50746	97%	1544	0,432	Hour21	704	5869	119616	97%	3639	2,038
Hour22	0	1992	51294	98%	996	0,279	Hour22	0	4695	120907	98%	2348	1,315
Hour23	0	1494	51543	99%	747	0,209	Hour23	0	3522	121494	99%	1761	0,986
Hour24	0	0	52290	100%	0	0,000	Hour24	0	0	123255	100%	0	0,000

e3						e4							
Hour	Trips		EVs_Available	Percentage Available	EVs_Trip	Consumed_Energy(MWh)	Hour	Trips		EVs_Available	Percentage Available	EVs_Trip	Consumed_Energy(MWh)
	Trip_one	Trip_two						Trip_one	Trip_two				
Hour1	0	0	242775	100%	0	0,000	Hour1	0	0	156870	100%	0	0,000
Hour2	0	0	242775	100%	0	0,000	Hour2	0	0	156870	100%	0	0,000
Hour3	0	0	242775	100%	0	0,000	Hour3	0	0	156870	100%	0	0,000
Hour4	0	0	242775	100%	0	0,000	Hour4	0	0	156870	100%	0	0,000
Hour5	0	0	242775	100%	0	0,000	Hour5	0	0	156870	100%	0	0,000
Hour6	0	6936	239306	99%	3468	4,855	Hour6	0	4482	154629	99%	2241	6,275
Hour7	0	23121	231214	95%	11561	16,185	Hour7	0	14940	149400	95%	7470	20,916
Hour8	462	46243	219191	90%	23584	33,017	Hour8	299	29880	141631	90%	15239	42,669
Hour9	925	30058	226821	93%	15954	22,335	Hour9	598	19422	146561	93%	10309	28,864
Hour10	1387	20809	230983	95%	11792	16,509	Hour10	896	13446	149251	95%	7619	21,334
Hour11	3237	25434	226821	93%	15954	22,335	Hour11	2092	16434	146561	93%	10309	28,864
Hour12	2312	25434	227746	94%	15029	21,040	Hour12	1494	16434	147159	94%	9711	27,191
Hour13	1387	27746	227515	94%	15260	21,364	Hour13	896	17928	147010	94%	9860	27,609
Hour14	1850	25434	228208	94%	14566	20,393	Hour14	1195	16434	147458	94%	9412	26,354
Hour15	2775	30058	224971	93%	17803	24,925	Hour15	1793	19422	145366	93%	11504	32,211
Hour16	1850	34682	223584	92%	19191	26,867	Hour16	1195	22410	144470	92%	12400	34,721
Hour17	1850	43931	218960	90%	23815	33,341	Hour17	1195	28386	141482	90%	15388	43,087
Hour18	1387	34682	224046	92%	18728	26,220	Hour18	896	22410	144769	92%	12101	33,884
Hour19	1850	23121	229364	94%	13410	18,775	Hour19	1195	14940	148205	94%	8665	24,263
Hour20	462	13873	235376	97%	7399	10,358	Hour20	299	8964	152089	97%	4781	13,386
Hour21	1387	11561	235607	97%	7168	10,035	Hour21	896	7470	152239	97%	4631	12,968
Hour22	0	9249	238150	98%	4624	6,474	Hour22	0	5976	153882	98%	2988	8,366
Hour23	0	6936	239306	99%	3468	4,855	Hour23	0	4482	154629	99%	2241	6,275
Hour24	0	0	242775	100%	0	0,000	Hour24	0	0	156870	100%	0	0,000

e5							e6						
Hour	Trips		EVs_Available	Percentage Available	EVs_Trip	Consumed_Energy(MWh)	Hour	Trips		EVs_Available	Percentage Available	EVs_Trip	Consumed_Energy(MWh)
	Trip_one	Trip_two						Trip_one	Trip_two				
Hour1	0	0	119520	100%	0	0,000	Hour1	0	0	33615	100%	0	0,000
Hour2	0	0	119520	100%	0	0,000	Hour2	0	0	33615	100%	0	0,000
Hour3	0	0	119520	100%	0	0,000	Hour3	0	0	33615	100%	0	0,000
Hour4	0	0	119520	100%	0	0,000	Hour4	0	0	33615	100%	0	0,000
Hour5	0	0	119520	100%	0	0,000	Hour5	0	0	33615	100%	0	0,000
Hour6	0	3415	117812	99%	1707	11,952	Hour6	0	960	33135	99%	480	6,723
Hour7	0	11383	113829	95%	5691	39,840	Hour7	0	3201	32015	95%	1601	22,410
Hour8	228	22766	107909	90%	11611	81,274	Hour8	64	6403	30350	90%	3265	45,717
Hour9	455	14798	111666	93%	7854	54,979	Hour9	128	4162	31406	93%	2209	30,926
Hour10	683	10245	113715	95%	5805	40,637	Hour10	192	2881	31982	95%	1633	22,858
Hour11	1594	12521	111666	93%	7854	54,979	Hour11	448	3522	31406	93%	2209	30,926
Hour12	1138	12521	112121	94%	7399	51,792	Hour12	320	3522	31534	94%	2081	29,133
Hour13	683	13659	112007	94%	7513	52,589	Hour13	192	3842	31502	94%	2113	29,581
Hour14	911	12521	112349	94%	7171	50,198	Hour14	256	3522	31598	94%	2017	28,237
Hour15	1366	14798	110755	93%	8765	61,354	Hour15	384	4162	31150	93%	2465	34,512
Hour16	911	17074	110072	92%	9448	66,134	Hour16	256	4802	30958	92%	2657	37,201
Hour17	911	21627	107796	90%	11724	82,070	Hour17	256	6083	30318	90%	3297	46,165
Hour18	683	17074	110300	92%	9220	64,541	Hour18	192	4802	31022	92%	2593	36,304
Hour19	911	11383	112918	94%	6602	46,214	Hour19	256	3201	31758	94%	1857	25,996
Hour20	228	6830	115877	97%	3643	25,498	Hour20	64	1921	32591	97%	1024	14,342
Hour21	683	5691	115991	97%	3529	24,701	Hour21	192	1601	32623	97%	992	13,894
Hour22	0	4553	117243	98%	2277	15,936	Hour22	0	1281	32975	98%	640	8,964
Hour23	0	3415	117812	99%	1707	11,952	Hour23	0	960	33135	99%	480	6,723
Hour24	0	0	119520	100%	0	0,000	Hour24	0	0	33615	100%	0	0,000

e7						
Hour	Trips		EVs_Available	Percentage Available	EVs_Trip	Consumed_Energy(MWh)
	Trip_one	Trip_two				
Hour1	0	0	18675	100%	0	0,000
Hour2	0	0	18675	100%	0	0,000
Hour3	0	0	18675	100%	0	0,000
Hour4	0	0	18675	100%	0	0,000
Hour5	0	0	18675	100%	0	0,000
Hour6	0	534	18409	99%	267	7,470
Hour7	0	1779	17786	95%	889	24,900
Hour8	36	3557	16861	90%	1814	50,797
Hour9	71	2312	17448	93%	1227	34,363
Hour10	107	1601	17768	95%	907	25,398
Hour11	249	1956	17448	93%	1227	34,363
Hour12	178	1956	17519	94%	1156	32,371
Hour13	107	2134	17501	94%	1174	32,869
Hour14	142	1956	17555	94%	1121	31,375
Hour15	213	2312	17306	93%	1370	38,347
Hour16	142	2668	17199	92%	1476	41,335
Hour17	142	3379	16843	90%	1832	51,295
Hour18	107	2668	17235	92%	1441	40,339
Hour19	142	1779	17644	94%	1032	28,884
Hour20	36	1067	18106	97%	569	15,936
Hour21	107	889	18124	97%	551	15,438
Hour22	0	711	18320	98%	356	9,960
Hour23	0	534	18409	99%	267	7,470
Hour24	0	0	18675	100%	0	0,000

Hour	Total Consumed_Energy (MWh)
Hour1	0
Hour2	0
Hour3	0
Hour4	0
Hour5	0
Hour6	38
Hour7	128
Hour8	262
Hour9	177
Hour10	131
Hour11	177
Hour12	167
Hour13	169
Hour14	162
Hour15	197
Hour16	213
Hour17	264
Hour18	208
Hour19	149
Hour20	82
Hour21	80
Hour22	51
Hour23	38
Hour24	0

MaxTransfer							
Hour	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7
Hour1	157	370	728	471	359	101	112
Hour2	157	370	728	471	359	101	112
Hour3	157	370	728	471	359	101	112
Hour4	157	370	728	471	359	101	112
Hour5	157	370	728	471	359	101	112
Hour6	155	364	718	464	353	99	55
Hour7	149	352	694	448	341	96	53
Hour8	142	334	658	425	324	91	51
Hour9	147	345	680	440	335	94	52
Hour10	149	352	693	448	341	96	53
Hour11	147	345	680	440	335	94	52
Hour12	147	347	683	441	336	95	53
Hour13	147	347	683	441	336	95	53
Hour14	147	348	685	442	337	95	53
Hour15	145	343	675	436	332	93	52
Hour16	144	341	671	433	330	93	52
Hour17	141	333	657	424	323	91	51
Hour18	145	341	672	434	331	93	52
Hour19	148	349	688	445	339	95	53
Hour20	152	358	706	456	348	98	54
Hour21	152	359	707	457	348	98	54
Hour22	154	363	714	462	352	99	55
Hour23	155	364	718	464	353	99	110
Hour24	157	370	728	471	359	101	112

### 3.3 Περιγραφή του προτεινομένου υπολογιστικού προγράμματος

#### 3.3.1 Δομή των διανυσματικών παραμέτρων

Όπως έχει αναφερθεί, το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την επίλυση του ΠΔΜ&ΗΟ είναι ο ERC – FROFI. Πρακτικά η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει ως μέθοδο βελτιστοποίησης τον εξελικτικό αλγόριθμο FROFI, όπως αυτός αναλύθηκε σε προηγούμενη υποενότητα. Παράλληλα στη μέθοδο έχουν ενσωματωθεί κάποιες ευρετικές μέθοδοι επιδιόρθωσης, οι οποίες μεταβάλλουν τα διανύσματα των υποψήφιων λύσεων έτσι ώστε αυτά να παρουσιάζουν ελάχιστη ή καθόλου παραβίαση των περιορισμών. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η διαδικασία βελτιστοποίησης, καθώς ο πληθυσμός των λύσεων κινείται ταχύτερα προς περιοχές του πεδίου λύσεων με καλύτερες τιμές αντικειμενικής (χαμηλότερο κόστος). Για όλα τα σενάρια που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική, ο πληθυσμός αποτελείται από 60 άτομα. Μελετάται σύστημα 10 μονάδων μαζί με την ενέργεια που προσφέρεται στα ΗΟ από το σύστημα, για 7 κατηγορίες ΗΟ όπως αναφέραμε προηγουμένως, για το χρονικό διάστημα 24 ωρών ( $T=24h$ ) με αποτέλεσμα οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος να συνιστούν ένα διάνυσμα διαστάσεων:

- $D = N \cdot T + E \cdot T = 10 \cdot 24 + 7 \cdot 24 = 408$
- $NP = 60$  μέγεθος πληθυσμού

Το διάνυσμα μιας υποψήφιας λύσης, αρχικοποιείται με τυχαία επιλογή τιμών και περιέχει τα ποσά καθαρής ισχύος που αποδίδει η μονάδα  $i$  την ώρα  $t$  στο σύστημα, αυτές είναι οι 240 πρώτες τιμές αφού έχουμε  $N = 10$  μηχανές και  $t = 24$  ώρες. Ενώ οι τελευταίες 168 τιμές αφορούν τα ποσά ισχύος που προσφέρεται σε κάθε κατηγορία  $e$  την ώρα  $t$  από το σύστημα, αφού έχουμε  $E=7$  κατηγορίες οχημάτων και  $t = 24$  ώρες :

$$P_i^t \in [0, Pmax_i] \text{ για } i = 1, \dots, N, \forall t$$

$$P_e^t \in [0, MaxTransfer_{e,t}] \text{ για } e = 1, \dots, E$$

Η συνάρτηση μετασχηματισμού που καθορίζει την κατάσταση μιας μονάδας είναι η εξής:

$$u_i^t = \begin{cases} 0, & \text{αν } 0 \leq P_i^t \leq Pmin_i \\ 1, & \text{αν } Pmin_i \leq P_i^t \leq Pmax_i \end{cases} \quad (3.7)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, μία μονάδα που αποδίδει καθαρή ισχύ μεγαλύτερη του ελάχιστου επιτρεπόμενου ορίου της, θεωρείται ανοιχτή. Με τον τρόπο αυτό διαχειριζόμαστε ταυτόχρονα την κατανομή φορτίου και τον προγραμματισμό ένταξης μονάδων.

### 3.3.2 Περιγραφή των Μηχανισμών Επιδιόρθωσης

Παρακάτω θα περιγράψουμε τους βασικούς μηχανισμούς επιδιόρθωσης που χρησιμοποιούμε στο υπολογιστικό μας πρόβλημα. Οι μηχανισμοί αυτοί εκτελούνται για την επίλυση του ΠΔΜ και εφόσον η επίλυση του δικού μας προβλήματος ΠΔΜ&ΗΟ είναι βασισμένο στα χαρακτηριστικά του αρχικού ΠΔΜ είναι εύλογο να τους αναλύσουμε. Οι εξτρά μηχανισμοί επιδιορθώσεις για το μοντέλο του ΠΔΜ&ΗΟ θα αναλυθούν με ακρίβεια σε επόμενη ενότητα.

Το ΠΔΜ είναι ένα μεγάλης κλίμακας πρόβλημα με μεγάλο αριθμό περιορισμών και αρκετά περίπλοκο. Έτσι, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορεί να συναντήσουν μερικές δυσκολίες για τη εύρεση εφικτών φορέων λύσης. Σε αυτό το πλαίσιο, προτείνεται η αξιοποίηση των μηχανισμών επιδιόρθωσης, για την καθοδήγηση της αναζήτησης προς την εφικτή περιοχή. Ο ευριστικός που υιοθετείται εδώ είναι μια «προσέγγιση που αντικαθιστά πάντα», που σημαίνει ότι η επιδιορθωμένη έκδοση των ατόμων αποτελεί τον πληθυσμό. Αρχικά, υλοποιήθηκε σε προβλήματα με δυαδικές αντικειμενικές μεταβλητές, που αντιστοιχούν στον προγραμματισμό της κατάστασης των μονάδων. Στην παρούσα εργασία, τροποποιείται χρησιμοποιώντας συνεχείς μεταβλητές. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται δύο λίστες προτεραιότητας για την ταξινόμηση των μονάδων. Η πρώτη χρησιμοποιείται κατά τις αλλαγές του

χρονοδιαγράμματος on / off, ενώ η δεύτερη κατά τη διάρκεια της επιδιόρθωσης του περιορισμού ισορροπίας ισχύος. Επιπλέον, παρουσιάζεται ένα πρόσθετο μέρος για την επιδιόρθωση των παραβιάσεων του περιορισμού του ρυθμού κλίσης των μονάδων. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι ρυθμοί κλίσης ή οι περιορισμοί ισορροπίας ενέργειας ενδέχεται να παραβιαστούν ακόμη και μετά τον μηχανισμό επισκευής. Αυτή η υπολειπόμενη παραβίαση περιορισμού αντιμετωπίζεται επαρκώς από την τεχνική χειρισμού περιορισμών του FROFI. (Tsalavoutis V. et al., 2017)

### 3.3.2.1 Επιδιόρθωση Μηχανισμού Στρεφομένης Εφεδρείας

Σε περίπτωση που ένα δάνυσμα λύση παραβιάζει την απαίτηση επαρκούς στρεφομένης εφεδρείας για ορισμένες ώρες της περιόδου προγραμματισμού, προσαρμόζεται για να ικανοποιήσει τον προαναφερθέντα περιορισμό. Η διαδικασία επιδιόρθωσης χρησιμοποιεί μια λίστα προτεραιοτήτων που βασίζεται στο μέσο κόστος παραγωγής των μονάδων, όταν λειτουργούν με τη μέση ισχύ εξόδου τους:

$$M1_i = \frac{f_i(P_i)}{P_i} |_{x_i \cdot P_{max_i}} \quad (3.8)$$

όπου, το  $x_i$  είναι το ποσοστό, καθορίζει το επίπεδο παραγωγής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη μέσου κόστους. Άρα, για το  $M1_i$ :

$$x_i = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{P_{i,min}}{P_{i,max}}\right) \quad (3.9)$$

Όταν παραβιάζεται ο περιορισμός της στρεφομένης εφεδρείας, οι μη δεσμευμένες μονάδες ταξινομούνται με αύξουσα σειρά, βάσει του  $M1$ . Στη συνέχεια, οι φτηνότερες μονάδες δεσμεύονται μέχρις ότου ικανοποιηθεί ο περιορισμός. Αυτό το τμήμα του μηχανισμού επισκευής περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Θέτουμε  $t=1$
2. Ταξινομούμε τις μη δεσμευμένες μονάδες με αύξουσα σειρά με βάση το μέσο κόστος επιβάρυνσής τους ( $M1$ )
3. Υπολογίζουμε την παραβίαση του περιορισμού στρεφομένης εφεδρείας

$$R_t = \sum_{i=1}^N (u_i^t \cdot P_{i,max}) - P_D^t - P_R^t - \sum_{e=1}^E EnergyUp_{e,t}, \quad \forall t \quad (3.10)$$

4. Αν  $R_t \geq 0$  (επαρκής στρεφόμενη εφεδρεία), πάμε στο βήμα 6.
5. Δεσμεύουμε μη δεσμευμένες μονάδες, ξεκινώντας από εκείνη με τη χαμηλότερη τιμή  $M1$ , έως ότου ικανοποιηθεί η στρεφόμενη εφεδρεία. Η δέσμευση της μονάδας  $i$  την ώρα  $t$  υλοποιείται χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$P_i^t = P_{i,min} \quad (3.11)$$

6. Αν  $t < T$  τότε  $t = t + 1$  και πάμε στο βήμα 2. Αλλιώς σταματάμε.

Όπως φαίνεται στο βήμα 5, μια μονάδα δεσμεύεται θέτοντας την έξοδο ισχύος της ίση με το ελάχιστο όριο παραγωγής της μονάδας (Εξίσωση 3.11).

### 3.3.2.2 Επιδιόρθωση περιορισμού ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδων

Το χρονοδιάγραμμα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ορισμένων μονάδων ενδέχεται να παραβιάζει τον περιορισμό ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης, μετά το πρώτο μέρος του μηχανισμού. Προκειμένου να ικανοποιηθεί αυτοί τους περιορισμούς, ο αλγόριθμος αναζητά τις συνεχείς ώρες, όπου μια μονάδα αλλάζει την κατάστασή της από ανοιχτή σε κλειστή. Εάν παραβιάζεται ο ελάχιστος χρόνος ( $T_{i,up}$ ) ή ο χρόνος παύσης λειτουργίας ( $T_{i,down}$ ), η μονάδα δεσμεύεται για τις επόμενες ώρες έως ότου ικανοποιηθεί ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

1. Θέτουμε  $t=1$
2. Θέτουμε  $i=1$
3. Αν  $u_i^t = 0$  και  $u_i^{t-1} = 1$  και  $T_{i,on}^{t-1} < T_{i,up}$ , τότε δεσμεύουμε την μονάδα την ώρα  $t$  χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.11.
4. Αν  $u_i^t = 0$  και  $u_i^{t-1} = 1$  και  $t + T_{i,down} - 1 \leq T$  και  $T_{i,off}^{t+T_{i,down}-1} < T_{i,down}$ , τότε δεσμεύουμε την μονάδα την ώρα  $t$  χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.11.
5. Αν  $u_i^t = 0$  και  $u_i^{t-1} = 1$  και  $t + T_{i,down} - 1 > T$  και  $\sum_{j=t}^T u_i^j > 0$ , τότε δεσμεύουμε την μονάδα την ώρα  $t$  χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.11.

6. Ενημερώνουμε  $T_{i,on}$  και  $T_{i,off}$  χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.3 και 2.11.
7. Αν  $i < N$  τότε  $i = i + 1$  και πάμε στο βήμα 4.
8. Αν  $t < T$  τότε  $t = t + 1$  και πάμε στο βήμα 3. Αλλιώς σταματάμε.

### 3.3.2.3 Αποδέσμευση μονάδων με πλεονάζουσα παραγωγή ενέργειας

Η επιδιόρθωση του περιορισμού ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδων μπορεί να προκαλέσει πλεονάζουσα στρεφόμενη εφεδρεία. Ως αποτέλεσμα, ορισμένες μονάδες ενδέχεται να λειτουργούν σε επίπεδα χαμηλής απόδοσης, αυξάνοντας το συνολικό κόστος παραγωγής. Αυτές οι περιττές μονάδες πρέπει να αποδεσμευτούν. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται η λίστα προτεραιότητας που αναφέραμε σε προηγούμενη υποενότητα.

Η αποδέσμευση μιας μονάδας επηρεάζει τόσο την ποσότητα στρεφόμενης εφεδρείας όσο και τον περιορισμό ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδων. Έτσι, ξεκινώντας από τις μονάδες με τις υψηλότερες τιμές του  $M1$ , ο αλγόριθμος αποδεσμεύει τις μονάδες, οι οποίες μπορούν να απενεργοποιηθούν χωρίς να παραβιάζονται οι ελάχιστοι χρόνοι λειτουργίας/κράτησης και στρεφόμενης εφεδρείας, έως ότου δεν μπορούν να αποδεσμευτούν περισσότερες μονάδες. Αυτό το μέρος του μηχανισμού επισκευής αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Θέτουμε  $t = 1$
2. Θέτουμε  $i = 1$
3. Εάν η μονάδα  $i$  μπορεί να αποδεσμευτεί χωρίς να παραβιαστεί ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας/κράτησης και ο περιορισμός στρεφόμενης εφεδρείας, την τοποθετούμε τη σε μια λίστα  $SS1$ .
4. Αν  $i < N$  τότε  $i = i + 1$  και επιστρέφουμε στο βήμα 3.
5. Αν η πλεονάζουσα λίστα είναι άδεια, πάμε στο βήμα 7.
6. Απενεργοποιούμε τη μονάδα με το υψηλότερο  $M1$  στο  $SS1$  και την καταργούμε από τη λίστα. Η αποδέσμευση γίνεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$P_i^k = (k \cdot U(0,1)) \cdot P_{i,min} \quad (3.12)$$

Ανανεώνουμε τα  $T_{i,off}$ ,  $T_{i,on}$  και στρεφόμενη εφεδρεία χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.3, 2.11 και 3.10. Ελέγχουμε αν η επόμενη μονάδα στην  $SS1$  μπορεί να αποδεσμευθεί χωρίς να παραβιαστούν οι περιορισμοί της στρεφόμενης εφεδρείας και του ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης. Επαναλαμβάνουμε αυτά τα βήματα μέχρις ότου καμία μονάδα να μπορεί να αποδεσμευθεί.



7. Αν  $t < T$  τότε  $t = t + 1$  και πάμε στο βήμα 2. Αλλιώς σταματάμε.

Η αποδέσμευση της μονάδας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.12, η παραγόμενη ισχύ της μονάδας αρχικοποιείται στοχαστικά κάτω από την τιμή κατωφλίου ( $P_{i,min}$ ). Επιπλέον, το  $k$  είναι μια παράμετρος χρήστη, η οποία ελέγχει το άνω όριο της επανεγκατάστασης ( $k < 1$ ). Εφαρμόζεται στοχαστικότητα για να διατηρηθεί η ποικιλομορφία του πληθυσμού, σε μια προσπάθεια να αποφευχθεί πρόωρη σύγκλιση του αλγορίθμου. Το τελευταίο μπορεί να συμβεί αν η έξοδος της μονάδας έχει ρυθμιστεί σε μια προκαθορισμένη τιμή, οδηγώντας σε όμοια διανύσματα και μηδενικές διαφορές.

#### 3.3.2.4 Επιδιόρθωση ανάληψης/απόρριψης φορτίου μονάδων (Ramp Rates)

Η ικανότητα κάθε θερμικής μονάδας να αυξήσει ή να ελαττώσει την ισχύ που αποδίδει εξαρτάται από τους ρυθμούς ανάληψης και απόρριψης φορτίου που δύναται να υποστηρίξει. Συγκεκριμένα, το ποσοστό αυτό σε κάθε περίπτωση ορίζεται ίσο με 20% της ονομαστικής ισχύος κάθε μονάδας, μια προσέγγιση που είναι συνήθης στη σχετική βιβλιογραφία. Οι περιορισμοί ρυθμού κλίσης φορτίου μονάδων ενδέχεται να παραβιαστούν, καθώς μπορεί να έχει αλλοιωθεί η κατάσταση ορισμένων μονάδων. Για το λόγο αυτό, η ισχύς εξόδου των μονάδων ρυθμίζεται ώστε να ικανοποιεί τους περιορισμούς του ρυθμού κλίσης, ως εξής:

1. Θέτουμε  $t = 1$

2. Θέτουμε  $i = 1$

3. Αν  $u_i^t = 0$  ή  $u_i^{t-1} = 0$ , πάμε στο βήμα 6, αλλιώς υπολογίζουμε:

$$DP_i^t = P_i^t - P_i^{t-1} \quad (3.13)$$

4. Αν  $DP_i > RU_i$  τότε υπολογίζουμε:

$$P_i^t = P_i^{t-1} + RU_i \quad (3.14)$$

5. Αν  $DP_i < -RD_i$  τότε υπολογίζουμε:

$$P_i^t = P_i^{t-1} - RD_i \quad (3.15)$$

6. Αν  $i < N$  τότε  $i = i + 1$  και επιστρέφουμε στο βήμα 3.

7. Αν  $t < T$  τότε  $t = t + 1$  και πάμε στο βήμα 2. Αλλιώς σταματάμε.

### 3.3.2.5 Επιδιόρθωση ισοζυγίου ισχύος

Ο περιορισμός ισοζυγίου ισχύος μπορεί να παραβιαστεί μετά την επιδιόρθωση των ρυθμών κλίσης (Ramp Rates). Έτσι, η παραγωγή ορισμένων μονάδων θα πρέπει να τροποποιηθεί. Τα όρια κλίσης (Ramp rates) των μονάδων λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια αυτής της ρύθμισης.

Το μέσο κόστος παραγωγής μιας μονάδας είναι χαμηλότερο όταν λειτουργεί κοντά στη μέγιστη ισχύ παραγωγής. Επιπλέον, μια θερμική μονάδα που λειτουργεί σε χαμηλότερα επίπεδα παραγωγής μπορεί να επιβαρύνει το συνολικό κόστος λειτουργίας, καθώς ίσως χρειαστούν πρόσθετες μονάδες για να ικανοποιηθεί η συνολική προβλεπόμενη ζήτηση. Έτσι, είναι επιθυμητό, οι δεσμευμένες μονάδες να παράγουν ισχύ κοντά στην μέγιστη χωρητικότητα ισχύος τους. Σε αυτό το πλαίσιο, η λίστα προτεραιότητας που χρησιμοποιείται βασίζεται στο μέσο κόστος των μονάδων με την υψηλότερη ισχύ παραγωγής τους ( $P_{i,max}$ ):

$$M2_i = \frac{f_i(P_i)}{P_i} \Big|_{x_i \cdot P_{max_i}} \quad (3.16)$$

όπου

$$x_i = 1 \quad (3.17)$$

Αρχικά, υπολογίζεται η παραβίαση του περιορισμού της ζήτησης για κάθε ώρα. Εάν υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια, αφαιρείται από την παραγωγή των πιο δαπανηρών μονάδων που δεσμεύονται σύμφωνα με την  $M2$ . Παρόλα αυτά, εάν η ενέργεια που παράγεται από τις μονάδες λειτουργίας δεν είναι επαρκής, τότε η πρόσθετη ενέργεια κατανέμεται στις φθηνότερες δεσμευμένες μονάδες βάσει της  $M2$ , μέχρις ότου ικανοποιηθεί η ζήτηση. Η διαδικασία αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Θέτουμε  $t = 1$
2. Δημιουργούμε μια λίστα  $SS2$  με τις δεσμευμένες μονάδες την ώρα  $t$ .

3. Υπολογίζουμε την παραβίαση του περιορισμού ισοζυγίου ισχύος (Madzharov D. et al., 2014)

$$DV^t = \sum_{i=1}^N u_i^t \cdot P_i^t - P_D^t - \sum_{e=1}^E EnergyUp_{e,t} \quad (3.18)$$

4. Εάν  $DV^t > 0$  (πλεονάζουσα ενέργεια), και η πιο ακριβή δεσμευμένη μονάδα με βάση την  $M2$  στην  $SS2$ . Υπολογίζουμε τη μέγιστη δυνατή μείωση της ενέργειας της μονάδας, προκειμένου η μονάδα να παραμείνει δεσμευμένη:

$$DP_i^t = P_i^t - P_{i,min}^t \quad (3.19)$$

Αν  $DP_i^t > DV^t$  τότε ανανεώνουμε ισχύ που παράγει η μονάδα αυτή:

$$P_i^t = P_i^t - DV^t \quad (3.20)$$

και πάμε στο βήμα 6. Αλλιώς, θέτουμε  $P_i^t = P_{i,min}^t$ , διαγράφουμε την μονάδα από την  $SS2$  και επιστρέφουμε στο βήμα 3.

5. Εάν  $DV^t < 0$  (έλλειψη ενέργειας), και η φθηνότερη δεσμευμένη μονάδα με βάση την  $M2$  στην  $SS2$ . Η μέγιστη επιτρεπτή αύξηση της ενέργειας της μονάδας είναι:

$$DP_i^t = P_{i,max}^t - P_i^t \quad (3.21)$$

Αν  $DP_i^t > |DV^t|$ , τότε ανανεώνουμε ισχύ που παράγει η μονάδα αυτή:

$$P_i^t = P_i^t + |DV^t| \quad (3.22)$$

και πάμε στο βήμα 6. Αλλιώς, θέτουμε  $P_i^t = P_{i,max}^t$  διαγράφουμε την μονάδα από την  $SS2$  και επιστρέφουμε στο βήμα 3.

6. Αν  $t < T$  τότε  $t = t + 1$  και πάμε στο βήμα 1. Αλλιώς σταματάμε.

### 3.3.3 Επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για τα Ηλεκτρικά Οχήματα ( Without Repair Mechanism for EVs )

Στην περίπτωση αυτή θα περιγράψουμε το υπολογιστικό μοντέλο, που επιλύθηκε το ΠΔΜ&ΗΟ, χωρίς τον μηχανισμό επιδιόρθωσης που προτείνεται στην παρούσα εργασία με σκοπό την εύρεση καλύτερης λύσης αλλά και πιο γρήγορης υπολογιστικής δυνατότητας. Σύμφωνα με την εργασία των Madzharov, Delarue, D'haeseleer (Madzharov D. et al., 2014) έχουμε κάποιους περιορισμούς που αφορούν την λειτουργία και την προσαρμογή των ΗΟ στο σύστημα.

Αρχικά, ορίζουμε το άνω και κάτω κατώφλι οπου ο αλγόριθμος θα αρχικοποιήσει το πλήθος των διανυσμάτων οπου θα χρησιμοποιήσει για να βρεθεί η καλύτερη δυνατή λύση του προβλήματος.

1.  $0 \leq EnergyUp_{e,t} \leq MaxTransfer_{e,t}$  , τις τιμές της  $MaxTransfer$  τις υπολογίζουμε σύμφωνα με τα δεδομένα του συστήματος με τη βοήθεια του μαθηματικού τύπου  $MaxTransfer_{e,t} = EVsAvailable_{e,t} \cdot ChargeLine$

Στη συνέχεια, μέσα στο υποπρόβλημα που υπολογίζει το πρόγραμμα παραγωγής με τη βοήθεια των παραπάνω περιορισμών επιδιορθώσεις, έχουμε και τους περιορισμούς που αφορούν την επιδιόρθωση για καλύτερη δυνατή φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ένας βασικός περιορισμός είναι ότι τα οχήματα την ώρα που ξεκινούν τα ταξίδια τους πρέπει όλα να είναι πλήρως φορτισμένα. Στη παρούσα εργασία, η ώρα αυτή είναι  $StartHour=5$  όπου και από την ώρα αυτή ξεκινάει και ο ορίζοντας της 24ωρης περιόδου μας. Επίσης, την επόμενη μέρα μέχρι της 6 το πρωί θα πρέπει όλα τα οχήματα να είναι πλήρως φορτισμένα ώστε να ξαναξεκινήσουν τα ταξίδια τους. Για τον υπολογισμό της ενέργειας που διαθέτουν τα οχήματα από κάθε κατηγορία για κάθε ώρα έχουμε την μεταβλητή  $soc_{e,t}$ . Όπου μέσω του παρακάτω μαθηματικού τύπου γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί

$$soc_{e,t} = soc_{e,t-1} + \eta_{ch} \cdot EnergyUp_{e,t} - \frac{1}{\eta_{disch}} \cdot ConsumedEnergy_{e,t}$$

Επομένως, την ώρα  $StartHour=5$  θα πρέπει

2.  $soc_{e,t} = BatteryFull_e$ , δηλαδή την ώρα 5 που ξεκινούν τα οχήματα τα ταξίδια τους, όλα τα οχήματα από κάθε κατηγορία να είναι πλήρως φορτισμένα.(περιορισμός ισότητας)

Για τον παραπάνω περιορισμό, επειδή είναι δύσκολο να επιτευχθεί με ακρίβεια λόγω πολυπλοκότητας του συστήματος, οι υπολογισμοί μας γίνονται με ένα επιτρεπτό περιθώριο της τάξης 0.3 , 0.2 και 0.1 MWh.

Ένας ακόμα βασικός περιορισμός, είναι ότι το άθροισμα ισχύος της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας κάθε κατηγορίας οχημάτων την προηγούμενη ώρα με την ισχύ που προσφέρεται στα οχήματα από το σύστημα κάθε κατηγορίας την τωρινή στιγμή(ώρα) πολλαπλασιασμένη με την αποδοτικότητα της μπαταρίας κατά την φόρτιση να μην ξεπερνά την μέγιστη ποσότητα ισχύος των οχημάτων από κάθε κατηγορία, δηλαδή

$$3. \text{soc}_{e,t-1} + \eta_{ch} \cdot \text{EnergyUp}_{e,t} \leq \text{BatteryFull}_e$$

Οι παραπάνω περιορισμοί επιδιόρθωσης βοηθούν το σύστημα να φέρει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα τα οποία παρατίθενται σε επόμενη ενότητα. Θα δούμε ότι μόνο με τους παραπάνω περιορισμούς επιδιορθώσεις ο αλγόριθμος δεν μπορεί να ικανοποίηση με ακρίβεια τον περιορισμό της ισότητας. Οπότε προτείνεται παρακάτω μια μέθοδος με ένα νέο μηχανισμό επιδιόρθωσης που βοηθά τον αλγόριθμο να ικανοποιήσει τον περιορισμό ισότητας με μέγιστη ακρίβεια και να φτάσει σε επιθυμητά αποτελέσματα.

### 3.3.4 Επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων και Μηχανισμού Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs )

Στην περίπτωση αυτή θα περιγράψουμε το υπολογιστικό μοντέλο, που επιλύθηκε το ΠΔΜ&ΗΟ, με τον νέο μηχανισμό επιδιόρθωσης που προτείνεται στην παρούσα εργασία με σκοπό την εύρεση καλύτερης λύσης με μεγαλύτερη ακρίβεια από την προηγούμενη μέθοδο αλλά και πιο γρήγορης υπολογιστικής δυνατότητας. Σύμφωνα με την εργασία των Madzharov, Delague, D'haeseleer έχουμε κάποιους περιορισμούς που αφορούν την λειτουργία και την προσαρμογή των ΗΟ στο σύστημα, όπως περιγράψαμε και στη προηγούμενη ενότητα (Madzharov D. et al., 2014).

Η βασική διαφορά με την προηγούμενη μέθοδο είναι ότι τώρα καθώς ο αλγόριθμος υπολογίζει την κατάσταση της μπαταρίας (soc) για κάθε κατηγορία οχημάτων για κάθε ώρα χρησιμοποιεί πριν από αυτό μια συνθήκη που βοηθάει στην πιο γρήγορη κατεύθυνση στην περιοχή των επιθυμητών και καλύτερων δυνατών λύσεων. Επομένως έχουμε:

1. Για  $t = 1$  (ώρα 6) έως  $t=23$  (ώρα 4)
2. Αν ισχύει  $\text{soc}_{e,t-1} + \eta_{ch} \cdot \text{EnergyUp}_{e,t} > \text{BatteryFull}_e$ , δηλαδή αν το σύστημα έχει δώσει περισσότερη ενέργεια από το επιτρεπτό, τότε υπολογίζουμε τη διαφορά αυτή  $\text{Diff} = \text{soc}_{e,t-1} + \eta_{ch} \cdot \text{EnergyUp}_{e,t} - \text{BatteryFull}_e$  και έπειτα την αφαιρούμε από την ενέργεια που δίνει το σύστημα στη κάθε κατηγορία οχημάτων για κάθε ώρα  $\text{EnergyUp}_{e,t} = \text{EnergyUp}_{e,t} - \text{Diff}$ , αλλιώς αν δεν ισχύει πάμε στο βήμα 3 κατευθείαν.

3. Υπολογίζουμε την κατάσταση της μπαταρίας

$$soc_{e,t} = soc_{e,t-1} + \eta_{ch} \cdot EnergyUp_{e,t} - \frac{1}{\eta_{disch}} \cdot ConsumedEnergy_{e,t}$$

4. Για t=24 (ώρα 5)

5. Υπολογίζουμε την ενέργεια που θα δώσει το σύστημα στη κάθε κατηγορία οχημάτων την στιγμή t=24 (ώρα 5). Υπολογίζουμε την κατάσταση της μπαταρίας

$$EnergyUp_{e,t} = (BatteryFull_e - soc_{e,t-1} + \frac{1}{\eta_{disch}} \cdot ConsumedEnergy_{e,t}) / \eta_{ch}$$

Ουσιαστικά με τον παραπάνω μηχανισμό επιτυγχάνεται με ακρίβεια ο περιορισμός της ισότητας σε συνδυασμό με τον περιορισμό ανισότητας που κατευθύνει γρηγορότερα την λύση. Η ενέργεια που προσφέρεται στα οχήματα δεν πρέπει να ξεπερνά τα όρια πλήρους φόρτισης και ότι την ώρα 5 όλα τα οχήματα πρέπει να είναι πλήρως φορτισμένα, μέσω του τύπου που υπολογίζουμε την κατάσταση της μπαταρίας.

### 3.3.5 Επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Μηχανισμού Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs )

Εφόσον καταλήξαμε, και σύμφωνα με τα αποτελέσματα που θα δούμε σε παρακάτω ενότητα, ότι πιο σταθερός και ακριβής αλγόριθμος είναι αυτός με τον μηχανισμό επιδιόρθωσης που αναλύσαμε στην υποενότητα 3.3.4, θα επιλύσουμε και το ΠΔΜ&ΗΟ με Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας με τον τρόπο αυτόν. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, το μοντέλο που ακολουθεί η συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιεί μια ημιτονική συνάρτηση για την έκφραση της ισχύος που καλύπτουν οι ΑΠΕ σε αντίθεση με τη συνηθισμένη στοχαστική προσέγγιση σεναρίων που προκύπτουν από μετρήσεις στη ζητούμενη περιοχή. Η μελέτη εντάσσεται στην περίπτωση χαμηλού υπολειπομένου φορτίου (Low residual load case) που καλούνται να πράξουν οι θερμικές μονάδες για υψηλή διείσδυση. Σύμφωνα με την εργασία του E. Delague και των συνεργατών του (Delague E. et al., 2013), έχουμε την σχέση (2.15) που θα εντάξουμε τις ΑΠΕ στο σύστημα. Ο συντελεστής βαρύτητας διείσδυσης  $FD$ , αποτελεί το μέτρο διεισδύσεις των ΑΠΕ στο σύστημα και για διάφορες τιμές του  $[0,5/1/1,5]$  έχουμε την ανάλογη μεταβολή στην τιμή της ζήτησης. Στον αλγόριθμο επίλυσης για 10 μονάδες παραγωγής προκειμένου να εντάξουμε τις ΑΠΕ πρέπει να δημιουργήσουμε ένα νέο διάνυσμα ζήτησης το οποίο θα υπολογισθεί σύμφωνα με την σχέση (2.15).

### 3.4 Αντικειμενική συνάρτηση και διαδικασίες ERC – FROFI

Οι ανωτέρω διαδικασίες – διορθώσεις ολικά συνιστούν των ευρετικό μηχανισμό στον οποίο εισάγεται αρχικά ο κάθε πληθυσμός καθώς και οι απόγονοι αυτού σε κάθε γενεά, προκειμένου στην μεθόδευση του αλγορίθμου για αναζήτηση εφικτών λύσεων. Ο υπολογισμός της αντικειμενικής είναι το τελευταίο κομμάτι του υποπρογράμματος που περιέχει τον ευρετικό μηχανισμό. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί το μέτρο σύγκρισης μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού. Υπενθυμίζουμε η αντικειμενική περιέχει κόστος καυσίμου και κόστος εκκίνησης των μονάδων.

Οι τιμές που επιστρέφει το υποπρόγραμμα είναι:

- Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης
- Η συνολική παραβίαση περιορισμών
- Τον τελικό πίνακα υποψήφια λύσεων – Κατανομή Φορτίου (κάθε γραμμή του πίνακα αντίστοιχη στην υποψήφια λύση από κάθε 'τρέξιμο' του αλγορίθμου)

### 3.5 Κριτήριο τερματισμού – Λοιπές διαδικασίες αλγορίθμου

Το κριτήριο τερματισμού καθορίζεται από τον αριθμό των αξιολογήσεων της αντικειμενικής που ορίζεται αρχικά από το χρήστη. Ειδικά για ένα δείγμα πληθυσμού 60 ατόμων, ορίζοντας συνολικό αριθμό αξιολογήσεων της αντικειμενικής 1.000.000, η ολοκλήρωση του κώδικα πραγματοποιείται μετά την παραγωγή της γενεάς με αύξοντα αριθμό  $\frac{1.000.000}{60} = 16.666$ . Επιπλέον, εκτελέστηκαν 20 ανεξάρτητα «τρέξιματα» του κώδικα προκειμένου στην ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων.

Η επιστροφή στο βασικό πρόγραμμα συνοδεύεται από την εισαγωγή του πληθυσμού στη διαδικασία μετάλλαξης και διασταύρωσης. Παράγοντας λοιπόν ο αλγόριθμος το δiάνυσμα του απογόνου, ο αλγόριθμος νεοεισέρχεται στον ευρετικό μηχανισμό για την ικανοποίηση των περιορισμών του προβλήματος. Στη συνέχεια, επιστρέφοντας ο απόγονος στο κύριο πρόγραμμα, εισέρχεται στην διαδικασία επιλογής, όπου συγκρίνεται με το προαναφερθέν δiάνυσμα του γονέα, η επιβίωση των οποίων καθορίζεται από την τιμή της αντικειμενικής που επιφέρουν. Οι δύο τελευταίες διαδικασίες είναι αυτές της αντικατάστασης και της στρατηγικής μετάλλαξης του FROFI, όπως ακριβώς αυτές παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 1.5.3 και 1.5.4.

Τέλος αναφέρουμε ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από τον προγραμματισμό του ανωτέρω θέματος σε Laptop Lenovo Windows 7 με επεξεργαστή Intel® Core™ i5-2450M CPU @ 2.50 GHz.

## 4 Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μοντέλων βελτιστοποίησης που αναπτυχθήκαν και προτείνονται στην παρούσα εργασία. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για την ζήτηση, τα χαρακτηριστικά των μονάδων, των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά και των ΑΠΕ που εμφανίζονται στο κεφάλαιο 3 (Πίνακας 3.1, 3.2 και 3.5) παρουσιάζονται τρία διαφορετικά βασικά σενάρια τα οποία εξετάζουν το ΠΔΜ&ΗΟ. Αρχικά, επιλύεται η μέθοδος του ΠΔΜ&ΗΟ χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα και η μέθοδος του ΠΔΜ&ΗΟ με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα. Στη περίπτωση με τον Μηχανισμό Επιδιόρθωσης θα δούμε και την ανάλυση και επίλυση ορισμένων υποπεριπτώσεων (σύγκριση των δυο παραπάνω μεθόδων, σύγκριση συστημάτων ανάλογα με το ποσοστό διείσδυσης των οχημάτων για την περίπτωση με τον μηχανισμό επιδιόρθωσης, σύγκριση περιπτώσεων φόρτισης με και χωρίς χρονικό περιθώριο στο 24ωρο). Τέλος, θα παρουσιάσουμε το σύστημα για την επίλυση του ΠΔΜ&ΗΟ με διείσδυση των ΑΠΕ.

### 4.1 Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Without Repair Mechanism for EVs )

#### 4.1.1 Αποτελέσματα σε σύστημα 10 Μονάδων Παραγωγής

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της μεθόδου επίλυσης του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα για το σύστημα με 10 μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η επίλυση έγινε για μια περίοδο 24 ωρών που ξεκινούν από τις 6 το πρωί μέχρι την επόμενη μέρα στις 5 το πρωί για τους λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε σε αυτή την ενότητα αφορούν το πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας και το τελικό κόστος για κάθε περίπτωση ανάλογα την τιμή χαλάρωσης που δίνουμε στον περιορισμό ισότητας πλήρους φόρτισης των οχημάτων την ώρα 5.

##### 4.1.1.1 Περίπτωση για διαφορετικές τιμές χαλάρωσης στον περιορισμό ισότητας πλήρους φόρτισης των οχημάτων την ώρα 5

Οι παρακάτω τιμές αφορούν τη βέλτιστη δυνατή τιμή που κατάφερε ο αλγόριθμος να βρει ως λύση του συστήματος για 20 ανεξάρτητα 'τρέξιματα' και για τιμές χαλάρωσης όπως 0,5 MWh, 0,3 MWh, 0,2 MWh και 0,1 MWh.



Without Repair Mechanism 100% and Con_Viol 0,5		Without Repair Mechanism 100% and Con_Viol 0,3		Without Repair Mechanism 100% and Con_Viol 0,2		Without Repair Mechanism 100% and Con_Viol 0,1	
FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000	
Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values
1	647043	1	643892	1	644838	1	NaN
2	645775	2	NaN	2	NaN	2	NaN
3	644354	3	NaN	3	NaN	3	NaN
4	NaN	4	NaN	4	NaN	4	NaN
5	645878	5	NaN	5	NaN	5	NaN
6	642843	6	643657	6	644437	6	NaN
7	642700	7	NaN	7	NaN	7	NaN
8	642308	8	NaN	8	NaN	8	NaN
9	644976	9	NaN	9	NaN	9	NaN
10	642405	10	642410	10	NaN	10	NaN
11	NaN	11	NaN	11	NaN	11	NaN
12	643632	12	NaN	12	NaN	12	NaN
13	NaN	13	NaN	13	NaN	13	NaN
14	641805	14	NaN	14	NaN	14	NaN
15	NaN	15	NaN	15	NaN	15	NaN
16	NaN	16	641730	16	NaN	16	NaN
17	NaN	17	NaN	17	NaN	17	NaN
18	642388	18	643532	18	NaN	18	NaN
19	647600	19	NaN	19	NaN	19	NaN
20	643827	20	NaN	20	NaN	20	NaN
Min	641805	Min	641730	Min	644437	Min	0
Average	644110	Average	643044	Average	644637	Average	#ΔΙΑΙΡ./0!
Max	647600	Max	643892	Max	644838	Max	0
Std	1878	Std	930	Std	283	Std	#ΔΙΑΙΡ./0!
Time	8967	Time	8989	Time	9123	Time	
Average Time	448	Average Time	449	Average Time	456	Average Time	
3638 MW		3639 MW		3640 MW			

- Για τη περίπτωση με **0,5 MWh** χαλάρωση παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος λόγω παραβίασης του περιορισμού ισότητας (τα οχήματα να είναι πλήρως φορτισμένα την ώρα 5) δεν καταφέρνει σε έξι 'τρεξίματα' να βρει λύση για το πρόβλημα μας. Επίσης, βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει στα υπόλοιπα 'τρεξίματα' λύση, με ελάχιστη τιμή αντικειμενικής **641.805 \$**, μέση τιμή 644.110 \$, με τυπική απόκλιση 1878 \$ και μέση τιμή χρόνου κάθε 'τρεξίματος' 448 δευτερόλεπτα. Η συνολική ενέργεια που προσφέρεται στα οχήματα για να φορτιστούν είναι 3.638 MW, όπου λόγω της τιμής χαλάρωσης που θέσαμε διαφέρει από την τιμή ενέργειας που πραγματικά χρειάζονται τα οχήματα ώστε να φορτίσουν πλήρως.
- Για τη περίπτωση με **0,3 MWh** χαλάρωση ότι ο αλγόριθμος λόγω παραβίασης του περιορισμού ισότητας (τα οχήματα να είναι πλήρως φορτισμένα την ώρα 5) δεν καταφέρνει σε δεκαπέντε 'τρεξίματα' να βρει λύση για το πρόβλημα μας. Παράλληλα παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει στα υπόλοιπα 'τρεξίματα' λύση, με ελάχιστη τιμή αντικειμενικής **641.730 \$**, μέση τιμή 643.044 \$, με τυπική απόκλιση 930 \$ και μέση τιμή χρόνου κάθε 'τρεξίματος' 449 δευτερόλεπτα. Η συνολική ενέργεια που προσφέρεται στα οχήματα για να φορτιστούν είναι 3.639 MW, όπου λόγω της τιμής χαλάρωσης που θέσαμε δεν

αντιπροσωπεύει την τιμή ενέργειας που πραγματικά χρειάζονται τα οχήματα ώστε να φορτίσουν πλήρως.

- Για τη περίπτωση με **0,2 MWh** χαλάρωση ότι ο αλγόριθμος λόγω παραβίασης του περιορισμού ισότητας (τα οχήματα να είναι πλήρως φορτισμένα την ώρα 5) δεν καταφέρνει σε δεκαοχτώ 'τρεξίματα' να βρει λύση για το πρόβλημα μας. Επιπλέον, βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει στα υπόλοιπα 'τρεξίματα' λύση, με ελάχιστη τιμή αντικειμενικής **644.437 \$**, μέση τιμή 644.637 \$, με τυπική απόκλιση 283 \$ και μέση τιμή χρόνου κάθε 'τρεξίματος' 456 δευτερόλεπτα. Η συνολική ενέργεια που προσφέρεται στα οχήματα για να φορτιστούν είναι 3.640 MW, όπου λόγω της τιμής χαλάρωσης που θέσαμε δεν αντιπροσωπεύει την τιμή ενέργειας που πραγματικά χρειάζονται τα οχήματα ώστε να φορτίσουν πλήρως.
- Για τη περίπτωση με **0,1 MWh** χαλάρωση ο αλγόριθμος δεν καταφέρνει σε κανένα από τα 20 ανεξάρτητα 'τρεξίματα' να βρει λύση για το σύστημα. Η περίπτωση τιμής χαλάρωσης 0,1 MW καθιστά αδύνατη την επίλυση του προβλήματος καθώς ο περιορισμός ισότητας δεν μπορεί να ικανοποιηθεί. Είναι προφανές ότι αλγόριθμος αυτός είναι ασταθής και ακατάλληλος για την επίλυση του προβλήματος μας καθώς για μικρές τιμές χαλάρωσης δεν μπορεί να λειτουργήσει όπως αναμένουμε.

#### **4.2 Επίλυση με χρήση του μηχανισμού επιδιόρθωσης των περιορισμών για ηλεκτρικά οχήματα ( Repair Mechanism for EVs )**

##### **4.2.1 Αποτελέσματα σε σύστημα 10 Μονάδων Παραγωγής**

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της μεθόδου επίλυσης του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα για το σύστημα με 10 μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η επίλυση έγινε για μια περίοδο 24 ωρών που ξεκινούν από τις 6 το πρωί μέχρι την επόμενη μέρα στις 5 το πρωί για τους λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε σε αυτή την ενότητα αφορούν το πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας και το τελικό κόστος για 100% διείσδυση των οχημάτων. Θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο χωρίς τον μηχανισμό επιδιόρθωσης. Τέλος, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις χωρίς περιορισμό χρόνου επαναφόρτισης στο 24ωρο – με περιορισμού χρόνου επαναφόρτισης στο 24ωρο με την μέθοδο με μηχανισμό επιδιόρθωσης.

#### 4.2.1.1 Αποτελέσματα επίλυσης Προβλήματος Δέσμησης Μονάδων και Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs )

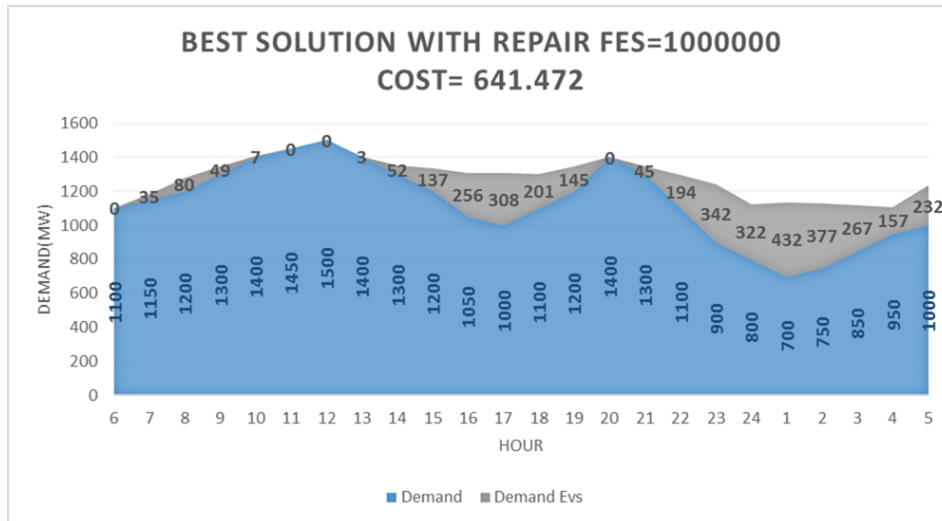
Ο αλγόριθμος αυτός με τον μηχανισμό επιδιόρθωσης για τα ηλεκτρικά οχήματα καταφέρνει να φέρει πολύ καλά αποτελέσματα. Είναι ικανός να ικανοποιήσει κάθε περιορισμό με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια, έτσι το πρόγραμμα παραγωγής που προτείνει είναι το βέλτιστο δυνατό για κάθε 'τρέξιμο'. Τα οχήματα επαναφορτίζονται πλήρως και ποτέ δεν ξεπερνούν τα όρια φόρτισης τους και το κόστος παραγωγής που επιστρέφει είναι πάντα το ελάχιστο δυνατό. Παρακάτω αναφέρονται τα αποτελέσματα από 20 ανεξάρτητα 'τρέξιμα' του αλγορίθμου που προτείνει ως καλύτερο και πιο ευσταθή η παρούσα εργασία για την επίλυση του ΠΔΜ&ΗΟ:

With Repair Mechanism 100%	
FES=1000000	
Runs	ObjF_Values
1	642214
2	642746
3	642746
4	642969
5	643699
6	642427
7	643420
8	643606
9	643488
10	643003
11	642952
12	643068
13	641472
14	643360
15	642943
16	643729
17	642924
18	642221
19	643597
20	647545
Min	641472
Average	643206
Max	647545
Std	1173
Time	8158
Average Time	408
3641 MW	

Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος δεν παρουσιάζει καμία παραβίαση οποιουδήποτε περιορισμού. Επιπλέον, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που βρίσκουμε δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους και δεν απέχουν πολύ και από τη μέση τιμή επομένως ο αλγόριθμος μπορεί να χαρακτηριστεί ευσταθής. Κατά τη διάρκεια των τρεξίματων παρατηρήθηκε ότι ο αλγόριθμος καταφέρνει να βρει λύση ακόμα και από τις πρώτες εκατό γενεές. Βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος προτείνει λύση και για τα 20 ανεξάρτητα 'τρέξιμα', με ελάχιστη τιμή αντικειμενικής **641.472 \$**, μέση τιμή 643.206 \$, με τυπική απόκλιση 1173 \$ και μέση τιμή χρόνου κάθε 'τρέξιματος' 408 δευτερόλεπτα. Η συνολική ενέργεια που προσφέρεται στα οχήματα για να φορτιστούν είναι 3.641 MW, που αντιπροσωπεύει

την τιμή ενέργειας που πραγματικά χρειάζονται τα οχήματα ώστε να φορτίσουν πλήρως.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η παραγομένη ισχύς για την περίπτωση που έχουμε ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση σε ένα 24ωρο. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η σταθερή ζήτηση του συστήματος και με γκρι χρώμα η εξτρά ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.



Σχήμα 4.1: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων

Πίνακας 4.1: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (MW)

Μονάδες/ Περίοδοι	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
2	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
3	78	104	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	0	0	0	0	0	130
4	87	113	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	25	57	90	122	154	162	162	140	115	116	116	118	111	130	162	130	104	72	82	92	87	77	67	62
6	0	0	0	20	32	48	64	74	58	42	26	20	20	20	33	20	20	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	25	25	33	42	25	25	25	0	0	0	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	10	11	21	10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	10	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0	2	1	8	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	1	0	2	0	0	0	0	9	3	12	26	9	10	0	1	7	0	0	0	1	1	0	9
13	0	2	10	0	1	0	0	0	0	80	28	58	23	1	0	1	32	127	77	7	3	1	4	3
14	0	4	14	4	0	0	0	0	23	29	17	4	6	55	0	1	2	39	7	21	188	138	0	42
15	0	9	14	17	0	0	0	0	15	19	72	105	91	32	0	14	29	34	96	320	128	60	3	73
16	0	9	7	5	4	0	0	2	1	4	85	62	33	18	0	20	91	91	91	47	4	16	40	6
17	0	10	34	18	0	0	0	0	3	0	41	51	39	21	0	6	33	51	51	36	53	51	110	98
Total	1100	1184	1280	1349	1407	1450	1500	1403	1352	1337	1306	1308	1301	1345	1400	1345	1294	1242	1122	1132	1127	1117	1107	1232

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζεται το πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας για σύστημα 10 μονάδων. Στον συγκεκριμένο πίνακα οι πρώτες 10 γραμμές αφορούν το ποσό ισχύος που παράγει κάθε μονάδα παραγωγής κάθε ώρα, ενώ οι 7 τελευταίες το ποσό ισχύος

που δίνεται στα οχήματα για κάθε κατηγορία κάθε ώρα. Η τελευταία γραμμή παρουσιάζει την τιμή ισχύος που παράγουν συνολικά όλες οι μονάδες κάθε ώρα.

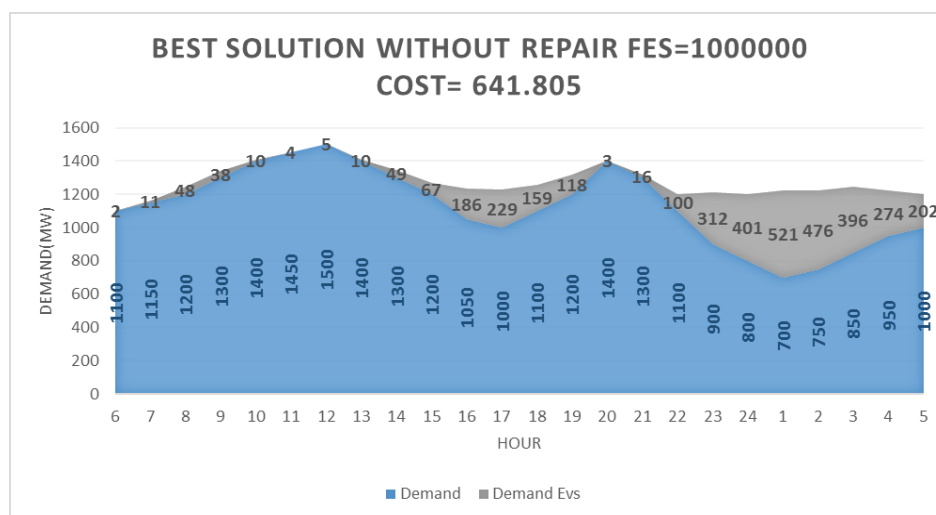
Όπως είναι προφανές και από το διάγραμμα αλλά και από τον πίνακα του προγράμματος παραγωγής, ο αλγόριθμος οδηγεί το σύστημα να καλύψει το μεγαλύτερο ποσοστό της απαιτούμενης ισχύος των οχημάτων κυρίως τις μεσημβρινές και βραδινές ώρες, όπου δεν υπάρχουν υψηλά επίπεδα σταθερής ζήτησης και έτσι μειώνεται το κόστος παραγωγής.

#### **4.2.1.2 Συγκριτικά Αποτελέσματα με Πρόβλημα χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs )**

Είναι προφανές ότι ο αλγόριθμος με τον μηχανισμό επιδιόρθωσης είναι πολύ πιο αποτελεσματικός και σταθερός από ότι ο αλγόριθμος χωρίς τον μηχανισμό επιδιόρθωσης για τα ηλεκτρικά οχήματα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος με τον μηχανισμό καταφέρνει να δώσει λύση που είναι εφικτή και έχει χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με όλες τις περιπτώσεις όπου δεν χρησιμοποιήθηκε ο μηχανισμός επιδιόρθωσης. Επίσης, χωρίς καμία παραβίαση περιορισμών, επιτυγχάνει πάντα τα ΗΟ να επαναφορτίζονται πλήρως ως την επιθυμητή ώρα. Αντιθέτως, ο αλγόριθμος χωρίς τον μηχανισμό επιδιόρθωσης για τα οχήματα δεν καταφέρνει πάντα να βρίσκει λύση όσο μειώνεται η τιμή χαλάρωση που του θέτουμε στο περιορισμό ισότητας. Αντιθέτως όταν βρίσκει το πετυχαίνει λόγω της υψηλής τιμής χαλάρωσης που του θέτουμε στο περιορισμό ισότητας που θέλουμε την ώρα 5 το πρωί όλα τα οχήματα να είναι πλήρως φορτισμένα. Αυτό, επιφέρει όμως μη αποδεκτά αποτελέσματα αφού τα οχήματα ουσιαστικά δεν καταφέρνουν να επαναφορτιστούν πλήρως ως εκείνη την ώρα. Όλα όσα επισημάνθηκαν παραπάνω επαληθεύονται από τα παρακάτω αποτελέσματα:

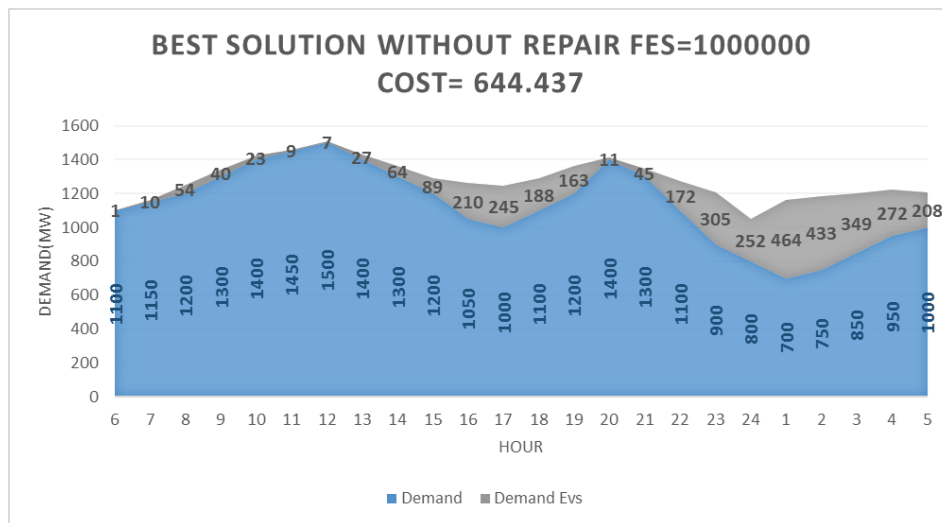
With Repair Mechanism 100%		Without Repair Mechanism 100% and Con_Viol 0,5		Without Repair Mechanism 100% and Con_Viol 0,3		Without Repair Mechanism 100% and Con_Viol 0,2		Without Repair Mechanism 100% and Con_Viol 0,1	
FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000	
Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values
1	642214	1	647043	1	643892	1	644838	1	NaN
2	642746	2	645775	2	NaN	2	NaN	2	NaN
3	642746	3	644354	3	NaN	3	NaN	3	NaN
4	642969	4	NaN	4	NaN	4	NaN	4	NaN
5	643699	5	645878	5	NaN	5	NaN	5	NaN
6	642427	6	642843	6	643657	6	644437	6	NaN
7	643420	7	642700	7	NaN	7	NaN	7	NaN
8	643606	8	642308	8	NaN	8	NaN	8	NaN
9	643488	9	644976	9	NaN	9	NaN	9	NaN
10	643003	10	642405	10	642410	10	NaN	10	NaN
11	642952	11	NaN	11	NaN	11	NaN	11	NaN
12	643068	12	643632	12	NaN	12	NaN	12	NaN
13	641472	13	NaN	13	NaN	13	NaN	13	NaN
14	643360	14	641805	14	NaN	14	NaN	14	NaN
15	642943	15	NaN	15	NaN	15	NaN	15	NaN
16	643729	16	NaN	16	641730	16	NaN	16	NaN
17	642924	17	NaN	17	NaN	17	NaN	17	NaN
18	642221	18	642388	18	643532	18	NaN	18	NaN
19	643597	19	647600	19	NaN	19	NaN	19	NaN
20	647545	20	643827	20	NaN	20	NaN	20	NaN
Min	641472	Min	641805	Min	641730	Min	644437	Min	0
Average	643206	Average	644110	Average	643044	Average	644637	Average	#ΔΙΑΠ./0!
Max	647545	Max	647600	Max	643892	Max	644838	Max	0
Std	1173	Std	1878	Std	930	Std	283	Std	#ΔΙΑΠ./0!
Time	8158	Time	8967	Time	8989	Time	9123	Time	
Average Time	408	Average Time	448	Average Time	449	Average Time	456	Average Time	
3641 MW		3638 MW		3639 MW		3640 MW			

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η παραγομένη ισχύς για την περίπτωση (χωρίς μηχανισμό επιδιόρθωσης) που έχουμε ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για τιμή χαλάρωσης 0,5 MWh ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση σε ένα 24ωρο. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η σταθερή ζήτηση του συστήματος και με γκρι χρώμα η εξτρά ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.



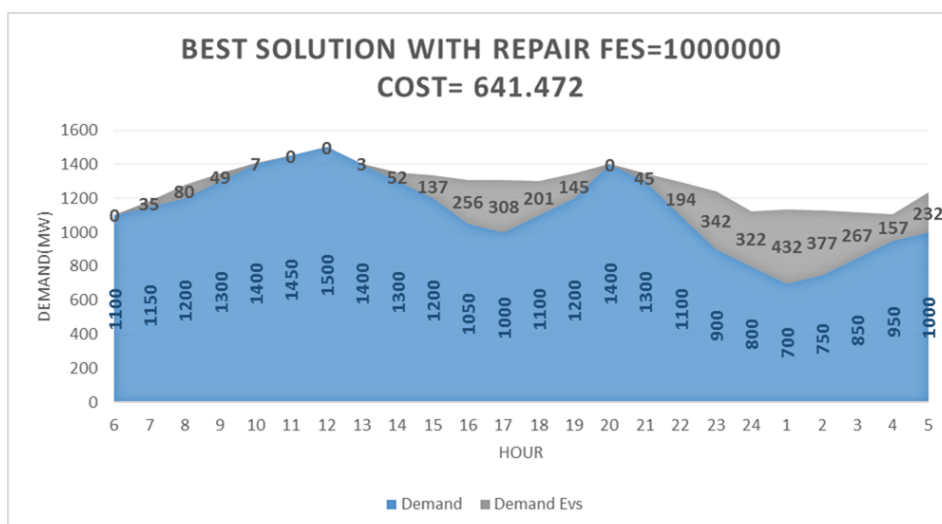
Σχήμα 4.2: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων για τιμή χαλάρωσης 0,5 MW

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η παραγομένη ισχύς για την περίπτωση (χωρίς μηχανισμό επιδιόρθωσης) που έχουμε ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για τιμή χαλάρωσης 0,2 MWh ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση σε ένα 24ωρο. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η σταθερή ζήτηση του συστήματος και με γκρι χρώμα η εξτρά ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.



Σχήμα 4.3: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων για τιμή χαλάρωσης 0,2 MW

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η παραγομένη ισχύς για την περίπτωση (με μηχανισμό επιδιόρθωσης) που έχουμε ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση σε ένα 24ωρο. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η σταθερή ζήτηση του συστήματος και με γκρι χρώμα η εξτρά ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.



Σχήμα 4.4: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων

Από τα παραπάνω διαγράμματα και όσων παρατηρήσεων επισημάνθηκαν πριν, είναι φανερό ότι ο αλγόριθμος με τον μηχανισμό επιδιόρθωσης είναι καταλληλότερος για την επίλυση του προβλήματος μας αφού βρίσκει χαμηλότερη τιμή κόστους και σε λιγότερο χρόνο 'τρέξιματος'.

#### 4.2.1.3 Αποτελέσματα ανάλογα το ποσοστό Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων στο σύστημα

Σύμφωνα με την προηγούμενη υποενότητα είναι πλέον προφανές ότι ο αλγόριθμος με τον προτεινόμενο μηχανισμό επιδιόρθωσης για τα ηλεκτρικά οχήματα είναι καταλληλότερος, από τον αλγόριθμο χωρίς τον μηχανισμό. Επομένως, στη πορεία της εργασίας τα αποτελέσματα που αναφέρονται θα αφορούν τη μέθοδο που προτείνεται με τον μηχανισμό επιδιόρθωσης.

Σε αυτή την υποενότητα θα δούμε τα αποτελέσματα που συλλέξαμε ανάλογα με το ποσοστό Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων στο σύστημα. Θα δούμε το πρόγραμμα παραγωγής που προτείνεται για την ελάχιστη δυνατή τιμή που κατάφερε να βρει ο αλγόριθμος για 20 ανεξάρτητα 'τρέξιματα' και θα συγκρίνουμε τις μεταβολές της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης και τη μεταβολή της ζήτησης ανάλογα το κάθε ποσοστό διείσδυσης των οχημάτων.

Παρακάτω αναφέρονται τα αποτελέσματα για 100%, 80%, 50%, 20% και 0% διείσδυση των οχημάτων στο σύστημα:

With Repair Mechanism 100%		With Repair Mechanism 80%		With Repair Mechanism 50%		With Repair Mechanism 20%		0% EVs Penetration	
FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000	
Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values
1	642214	1	624635	1	602638	1	583119	1	566889
2	642746	2	625496	2	603329	2	580648	2	567561
3	642746	3	624617	3	602696	3	582018	3	566818
4	642969	4	624656	4	603303	4	583591	4	567054
5	643699	5	624640	5	602656	5	580422	5	566835
6	642427	6	624734	6	603258	6	583088	6	567096
7	643420	7	624661	7	603292	7	583076	7	566835
8	643606	8	624633	8	602605	8	583598	8	567109
9	643488	9	624713	9	602673	9	583609	9	567043
10	643003	10	624633	10	603328	10	583570	10	567130
11	642952	11	624604	11	603153	11	580123	11	567149
12	643068	12	625480	12	603283	12	581923	12	567556
13	641472	13	624980	13	603352	13	583673	13	567610
14	643360	14	624695	14	602643	14	583126	14	567707
15	642943	15	625523	15	603228	15	580697	15	566848
16	643729	16	624629	16	603298	16	580587	16	567571
17	642924	17	625535	17	603330	17	580596	17	567558
18	642221	18	625501	18	602678	18	581914	18	567096
19	643597	19	624827	19	604007	19	580560	19	567025
20	647545	20	624988	20	602714	20	581853	20	567038
Min	641472	Min	624604	Min	602605	Min	580123	Min	566818
Average	643206	Average	624909	Average	603073	Average	582090	Average	567176
Max	647545	Max	625535	Max	604007	Max	583673	Max	567707
Std	1173	Std	370	Std	381	Std	1323	Std	300
Time	8158	Time	8282	Time	8840	Time	10331	Time	10771
Average Time	408	Average Time	414	Average Time	442	Average Time	517	Average T	539
3641 MW		2913 MW		1821 MW		728 MW		0 MW	



Όπως είναι προφανές καθώς μειώνεται η διείσδυση των οχημάτων, άρα και η ζητούμενη ποσότητα ισχύος που πρέπει να καλυφθεί, τότε μειώνεται και η τιμή αντικειμενική συνάρτηση δηλαδή το ελάχιστο δυνατό κόστος παραγωγής ενέργειας όπως και το ποσό ισχύος που χρειάζονται τα οχήματα για να επαναφορτιστούν.

- Για την περίπτωση με **100% διείσδυση** έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **641.472\$**, μέση τιμή 643.206 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 408 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που δίνεται στα οχήματα 3.641 MW.
- Για την περίπτωση με **80% διείσδυση** έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **624.604\$**, μέση τιμή 624.609 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 414 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που δίνεται στα οχήματα 2.913 MW.
- Για την περίπτωση με **50% διείσδυση** έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **602.606\$**, μέση τιμή 603.037 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 442 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που δίνεται στα οχήματα 1.821 MW.
- Για την περίπτωση με **20% διείσδυση** έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **580.123\$**, μέση τιμή 582.090 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 517 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που δίνεται στα οχήματα 728 MW.
- Για την περίπτωση με **0% διείσδυση** έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **566.818\$**, μέση τιμή 567.176 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 539 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που δίνεται στα οχήματα 0 MW.

Όσο μειώνεται το ποσοστό διείσδυσης είναι λογικό ο αλγόριθμος να κάνει περισσότερο χρόνο για το κάθε 'τρέξιμο' αφού ξεκινάει με τυχαίες τιμές ισχύος υψηλές σε σχέση με το ποσό που πρέπει να καλυφθεί. Έτσι μέχρι να βρει την κατάλληλη λύση ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί με την ελάχιστη δυνατή τιμή κόστους και καλύτερου δυνατού προγράμματος παραγωγής απαιτείται περισσότερος υπολογιστικός χρόνος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα υπολογίσαμε και κάποιες μεταβολές που μας βοηθούν να καταλάβουμε το σύστημα καλύτερα:

Evs Penetration	Demand	Total Evs	Min Cost	Average Cost	Min Cost Deference from 0%	Average Cost Deference from 0%	Min Cost Deference from 100%	Average Cost Deference from 100%	Demand Penetration	Total Demand Evs Penetration
0%	27100	0	566818	567176	0,00%	0,00%	-13,17%	-13,41%	0,00%	0%
20%	27728	149400	580123	582090	2,35%	2,63%	-10,58%	-10,50%	2,32%	20%
50%	28920	373500	602605	603073	6,31%	6,33%	-6,45%	-6,65%	6,72%	50%
80%	30012	597600	624604	624909	10,19%	10,18%	-2,70%	-2,93%	10,75%	80%
100%	30740	747000	641472	643206	13,17%	13,41%	0,00%	0,00%	13,43%	100%

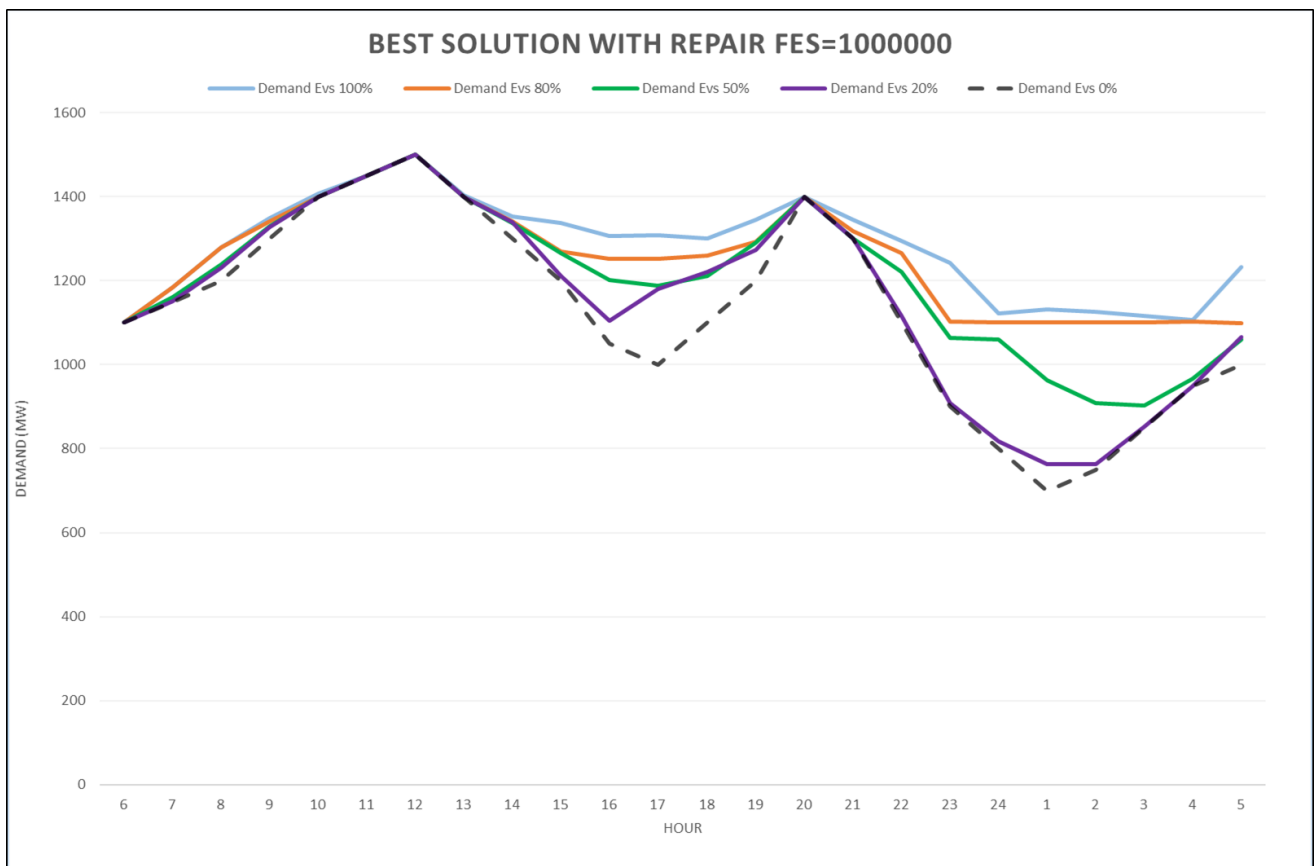
Παρατηρούμε ότι το ποσοστό μεταβολής του ελάχιστου κόστους και του μέσου κόστους διατηρούνται στα ίδια επίπεδα ανάλογα με το ποσοστό διείσδυσης των οχημάτων στο σύστημα. Με σημείο αναφοράς το 0% ποσοστό διήγησης έχουμε:

- Για 20% διείσδυση έχουμε 2,35% αύξηση του ελάχιστου κόστους, 2,63% αύξηση του μέσου κόστους και 2,32% αύξηση της συνολικής ζήτησης ισχύος.

- Για 50% διείσδυση έχουμε 6,31% αύξηση του ελάχιστου κόστους, 6,33% αύξηση του μέσου κόστους και 6,72% αύξηση της συνολικής ζήτησης ισχύος.
- Για 80% διείσδυση έχουμε 10,19% αύξηση του ελάχιστου κόστους, 10,18% αύξηση του μέσου κόστους και 10,75% αύξηση της συνολικής ζήτησης ισχύος.
- Για 100% διείσδυση έχουμε 13,17% αύξηση του ελάχιστου κόστους, 13,41% αύξηση του μέσου κόστους και 13,43% αύξηση της συνολικής ζήτησης ισχύος.

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι για κάθε 10% (περίπου 74.700 οχήματα) διείσδυση των οχημάτων στο σύστημα έχουμε αύξηση του κόστους παράγωγης ενέργειας κοντά στο 1,31% με 1,34%, δηλαδή περίπου κατά μέσο όρο 7.500 \$.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η παραγομένη ισχύς για την περίπτωση που έχουμε ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ποσοστό διείσδυσης ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση σε ένα 24ωρο.



Σχήμα 4.5: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων για κάθε ποσοστό διείσδυσης οχημάτων

Παρακάτω θα δούμε τα προγράμματα παραγωγής των μονάδων για 100% και 0% διείσδυση των ΗΟ ώστε να συγκρίνουμε τις διαφορές τους και να δούμε ποιες μονάδες ανοίγουν και κλείνουν μέσα στο 24ωρο.

Πίνακας 4.2: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (100% Διείσδυση) (MW)

Μονάδες/ Περίοδοι	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
2	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
3	78	104	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	0	0	0	0	0	130
4	87	113	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	25	57	90	122	154	162	162	140	115	116	116	118	111	130	162	130	104	72	82	92	87	77	67	62
6	0	0	20	32	48	64	74	58	42	26	20	20	20	33	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	25	25	33	42	25	25	25	0	0	0	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	10	11	21	10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	10	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0	2	1	8	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	1	0	2	0	0	0	0	9	3	12	26	9	10	0	1	7	0	0	0	1	1	0	9
13	0	2	10	0	1	0	0	0	0	80	28	58	23	1	0	1	32	127	77	7	3	1	4	3
14	0	4	14	4	0	0	0	0	23	29	17	4	6	55	0	1	2	39	7	21	188	138	0	42
15	0	9	14	17	0	0	0	0	15	19	72	105	91	32	0	14	29	34	96	320	128	60	3	73
16	0	9	7	5	4	0	0	2	1	4	85	62	33	18	0	20	91	91	91	47	4	16	40	6
17	0	10	34	18	0	0	0	0	3	0	41	51	39	21	0	6	33	51	51	36	53	51	110	98
Total	1100	1184	1280	1349	1407	1450	1500	1403	1352	1337	1306	1308	1301	1345	1400	1345	1294	1242	1122	1132	1127	1117	1107	1232

Πίνακας 4.3: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (0% Διείσδυση) (MW)

Μονάδες/ Περίοδοι	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	448	446	455	455	455
2	384	455	455	455	455	455	455	455	455	420	329	267	358	426	455	455	455	386	318	227	279	370	455	455
3	106	80	98	104	130	130	130	130	104	130	108	123	130	130	130	118	0	0	0	0	0	0	0	0
4	130	130	130	130	130	130	130	130	121	130	126	130	130	130	130	130	0	0	0	0	0	0	0	0
5	25	30	62	95	127	160	162	130	97	65	32	25	27	59	92	59	92	59	27	25	25	25	40	70
6	0	0	0	36	52	68	75	59	43	0	0	0	0	0	73	57	73	0	0	0	0	0	0	20
7	0	0	0	25	25	25	35	25	25	0	0	0	0	0	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	26	17	28	17	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	10	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	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	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	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	0	0	0	0
Total	1100	1150	1200	1300	1400	1450	1500	1400	1300	1200	1050	1000	1100	1200	1400	1300	1100	900	800	700	750	850	950	1000

Η μεγάλη διαφορά παρατηρείται στις μεσημβρινές και βραδινές ώρες όπου εκεί ο αλγόριθμος αποφασίζει να επαναφορτίσει το μεγαλύτερο πλήθος οχημάτων. Πιο

συγκεκριμένα, τις μεσημβρινές ώρες από τις 14.00 έως τις 19.00 καλύπτει το 30% ενώ από τις 21.00 έως τις 5.00 το 65% της απαιτούμενης ισχύος που επαναφορτίζονται τα οχήματα, αρά συνολικά εκείνες τις ώρες όπου δεν θεωρούνται ώρες αιχμής καλύπτεται το 95% της συνολικής ισχύος. Όλες τις ώρες οι μονάδες βάσεις (πρώτες δυο μονάδες) είναι πάντα εν ενέργεια εφόσον καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσό ισχύος αλλά είναι και οι πιο οικονομικές μονάδες, οι ενδιάμεσες μονάδες (μονάδα 3 έως 7) είναι οι επόμενες πιο οικονομικές μονάδες όπου και αυτές καλύπτουν μεγάλο ποσό ενέργειας. Τις ενδιάμεσες μονάδες ο αλγόριθμος επιλεγεί να τις έχει εν ενέργεια κυρίως τις ώρες αιχμής αλλά και τις ώρες που φορτίζονται τα οχήματα. Οι μονάδες 4,5 που παράγουν περισσότερη ισχύ είναι πάντα ανοιχτές και η μονάδα 3 κλείνει μόνο για πέντε ώρες το βραδύ και επανεκκινείται στις 5.00, οι μονάδες 6,7 είναι ανοιχτές από τις 8.00 έως 22.00 κυρίως αφού τότε το συνολικό ποσό ισχύος που απαιτεί το σύστημα είναι υψηλό και χρειάζεται η συμβολή τους. Τέλος, οι μονάδες αιχμής (μονάδες 8 έως 10) που είναι οι πιο ακριβές, λειτουργούν μόνο στις ώρες αιχμής, δηλαδή 9.00 έως 13.00 και στις 20.00, ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ισχύς.

#### **4.2.1.4 Πρόγραμμα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας χωρίς περιορισμό χρόνου στο 24ωρο – με περιορισμού χρόνου στο 24ωρο ( Perfect infrastructure – Modest infrastructure )**

Σε αυτή την υποενότητα θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα που έχουμε άμα θέσουμε ένα χρονικό όριο φόρτισης των οχημάτων σε σχέση με κανένα περιορισμό χρόνου μέσα στο 24ωρο που εξελίσσεται το πρόβλημα.

Στο σενάριο όπου δεν υπάρχει περιορισμός στο χρόνο φόρτισης (Perfect infrastructure), η φόρτιση είναι εφικτή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Στόχος της προσομοίωσης είναι η βέλτιστη φόρτιση όλων των ΗΟ και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όλα τα οχήματα πρέπει να έχουν επαναφορτιστεί (SOC 100%) μέχρι τις 06:00 το πρωί, έτσι ώστε τα ΗΟ να είναι έτοιμα για τα πρώτα πρωινά ταξίδια. Υποτίθεται ότι όλα τα ΗΟ που δεν είναι στο δρόμο είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο και είναι διαθέσιμα για φόρτιση.

Στο σενάριο όπου υπάρχει συγκεκριμένο χρονικό διάστημα όπου τα οχήματα μπορούν να επαναφορτιστούν (Modest infrastructure ) και σταθμοί είναι εγκατεστημένοι μόνο στο σπίτι. Κατά συνέπεια, η φόρτιση μπορεί να γίνει μόνο τις απογευματινές ώρες μετά την επιστροφή των ανθρώπων από την εργασία τους. Σε αυτήν την προσομοίωση, η φόρτιση είναι δυνατή μετά τις 20:00. Και πάλι ο στόχος του αλγορίθμου ελέγχου είναι να φορτίσει πλήρως τα ΗΟ μέχρι τις 06:00 το πρωί με ένα ελάχιστο κόστος παραγωγής.

Παρακάτω αναφέρονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτών των δυο διαφορετικών σεναρίων φόρτισης:

Perfect Infrastructure With Repair Mechanism 100%	
FES=1000000	
Runs	ObjF_Values
1	642214
2	642746
3	642746
4	642969
5	643699
6	642427
7	643420
8	643606
9	643488
10	643003
11	642952
12	643068
13	641472
14	643360
15	642943
16	643729
17	642924
18	642221
19	643597
20	647545
Min	641472
Average	643206
Max	647545
Std	1173
Time	8158
Average Time	408
<b>3641 MW</b>	

Modest Infrastructure With Repair Mechanism 100%	
FES=1000000	
Runs	ObjF_Values
1	651214
2	651422
3	647455
4	646901
5	651878
6	651578
7	647429
8	651857
9	651487
10	645870
11	648553
12	648529
13	651518
14	652301
15	648668
16	648609
17	651544
18	652055
19	651810
20	651903
Min	645870
Average	650129
Max	652301
Std	2098
Time	10444
Average Time	522
<b>3641 MW</b>	

### **Perfect infrastructure**

- Το ελάχιστο κόστος είναι 641.472 \$
- Το μέσο κόστος είναι 643.206 \$
- Η τυπική απόκλιση είναι 1.173 \$
- Ο μέσος χρόνος 'τρεξίματος' είναι 408 δευτερόλεπτα.
- Η ισχύς που επαναφορτίζονται τα οχήματα είναι η σωστή 3.641 MW

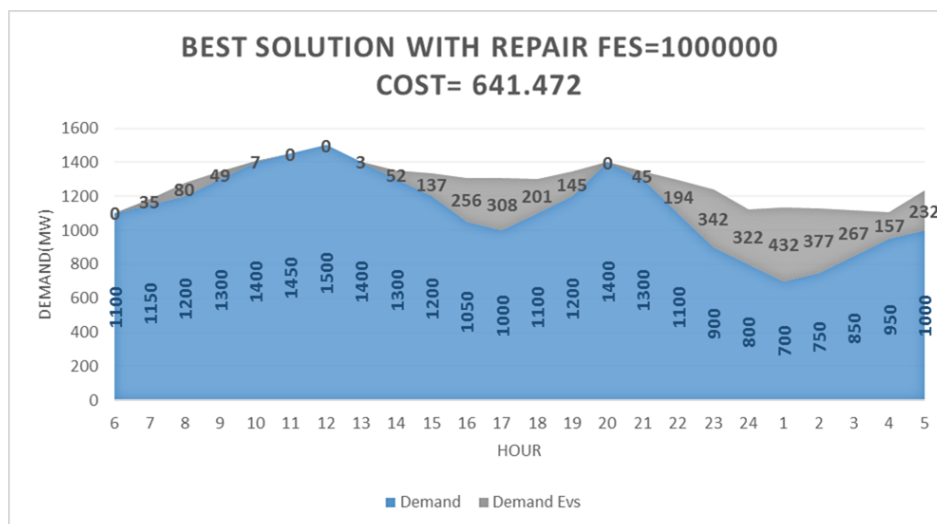
### **Modest infrastructure**

- Το ελάχιστο κόστος είναι 645.870 \$
- Το μέσο κόστος είναι 650.129 \$
- Η τυπική απόκλιση είναι 2.098 \$
- Ο μέσος χρόνος 'τρεξίματος' είναι 522 δευτερόλεπτα.
- Η ισχύς που επαναφορτίζονται τα οχήματα είναι η σωστή 3.641 MW

	Min Cost	Average Cost	Std	Average Time
Perfect Infrastructure With Repair Mechanism 100%	641472	643206	1173	408
Modest Infrastructure With Repair Mechanism 100%	645870	650129	2098	522
Difference % Perfect-Modest	0,69%	1,08%	79%	28%

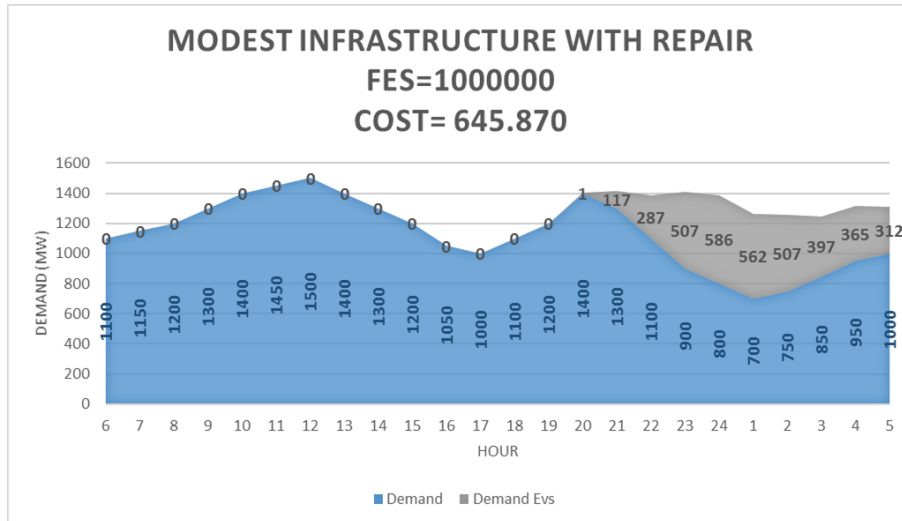
Από τα παραπάνω δεδομένα που αντλήσαμε από τις δυο περιπτώσεις, είναι προφανές ότι η περίπτωση Perfect infrastructure είναι πιο αποδοτική. Έχουμε χαμηλότερη τιμή κόστους και ως ελάχιστη τιμή (αύξηση 0,69% στο Modest) αλλά και ως μέσο κόστος (αύξηση 1.08% στο Modest). Επίσης, η τυπική απόκλιση είναι πιο χαμηλή που αυτό υποδηλώνει ότι η περίπτωση αυτή είναι πιο σταθερή και δεν υπάρχουν πολλές τιμές που αποκλίνουν από τη μέση τιμή κόστους (αύξηση 79% στο Modest). Τέλος, ο χρόνος 'τρέξιματος' είναι χαμηλότερος, αυτό είναι λογικό αφού περιορίζουμε τις ώρες που ο αλγόριθμος μπορεί να επαναφορτίσει τα οχήματα άρα του περιορίζουμε ακόμα περισσότερο τα υπολογιστικά του όρια (αύξηση 28% στο Modest).

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η παραγομένη ισχύς για την περίπτωση (Perfect infrastructure) που έχουμε ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση σε ένα 24ωρο. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η σταθερή ζήτηση του συστήματος και με γκρι χρώμα η εξτρά ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.



Σχήμα 4.6: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων (Perfect Infrastructure)

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η παραγομένη ισχύς για την περίπτωση (Modest infrastructure) που έχουμε ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση σε ένα 24ωρο. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η σταθερή ζήτηση του συστήματος και με γκρι χρώμα η εξτρά ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.



Σχήμα 4.7: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων (Modest Infrastructure)

Πίνακας 4.4: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (Perfect Infrastructure) (MW)

Μονάδες /Ωρες	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
2	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
3	78	104	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	0	0	0	0	0	130
4	87	113	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	25	57	90	122	154	162	162	140	115	116	116	118	111	130	162	130	104	72	82	92	87	77	67	62
6	0	0	20	32	48	64	74	58	42	26	20	20	20	20	33	20	20	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	25	25	33	42	25	25	25	0	0	0	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	10	11	21	10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	10	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0	2	1	8	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	1	0	2	0	0	0	0	9	3	12	26	9	10	0	1	7	0	0	0	1	1	0	9
13	0	2	10	0	1	0	0	0	0	80	28	58	23	1	0	1	32	127	77	7	3	1	4	3
14	0	4	14	4	0	0	0	0	23	29	17	4	6	55	0	1	2	39	7	21	188	138	0	42
15	0	9	14	17	0	0	0	0	15	19	72	105	91	32	0	14	29	34	96	320	128	60	3	73
16	0	9	7	5	4	0	0	2	1	4	85	62	33	18	0	20	91	91	91	47	4	16	40	6
17	0	10	34	18	0	0	0	0	3	0	41	51	39	21	0	6	33	51	51	36	53	51	110	98
Total	1100	1184	1280	1349	1407	1450	1500	1403	1352	1337	1306	1308	1301	1345	1400	1345	1294	1242	1122	1132	1127	1117	1107	1232

Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζεται το πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας για σύστημα 10 μονάδων για την περίπτωση με Perfect Infrastructure . Στον συγκεκριμένο πίνακα οι πρώτες 10 γραμμές αφορούν το ποσό ισχύος που παράγει κάθε μονάδα παραγωγής κάθε ώρα, ενώ οι 7 τελευταίες το ποσό ισχύος που δίνεται στα οχήματα για κάθε κατηγορία κάθε ώρα. Όπως είναι προφανές και από το διάγραμμα αλλά και το πρόγραμμα παραγωγής, ο αλγόριθμος οδηγεί το σύστημα να καλύψει το μεγαλύτερο ποσοστό της απαιτούμενης ισχύος των οχημάτων κυρίως τις μεσημβρινές και βραδινές ώρες, όπου δεν υπάρχουν υψηλά επίπεδα σταθερής ζήτησης και έτσι μειώνεται το κόστος παραγωγής.

Πίνακας 4.5: Κατάσταση μονάδων και Πρόγραμμα παραγωγής για σύστημα 10 μονάδων (Modest Infrastructure) (MW)

Μονάδες /Ωρες	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
2	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	364	274	328	399	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
3	59	84	95	104	130	130	130	130	104	102	95	116	130	126	130	130	130	130	130	125	130	130	130	130
4	106	124	130	130	130	130	130	130	122	123	104	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	25	32	65	97	129	162	162	130	97	65	32	25	57	90	122	154	151	162	130	97	87	77	109	122
6	0	0	0	34	50	66	74	58	42	0	0	0	0	0	73	57	41	50	62	0	0	0	36	20
7	0	0	0	25	25	25	35	25	25	0	0	0	0	0	25	25	25	25	25	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	26	17	28	17	0	0	0	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	10	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3	14
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	33	21	2	0	1	2
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	20	134	148	114	3	3	0	30
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	108	48	61	39	23	163	147	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	16	202	214	237	329	95	21	7
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	91	74	78	98	98	90	98	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	51	49	53	53	53	45	95	257
Total	1100	1150	1200	1300	1400	1450	1500	1400	1300	1200	1050	1000	1100	1200	1401	1417	1387	1407	1386	1262	1257	1247	1315	1312

Στον πίνακα 4.8 παρουσιάζεται το πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας για σύστημα 10 μονάδων για την περίπτωση με Modest Infrastructure. Στον συγκεκριμένο πίνακα οι πρώτες 10 γραμμές αφορούν το ποσό ισχύος που παράγει κάθε μονάδα παραγωγής κάθε ώρα, ενώ οι 7 τελευταίες το ποσό ισχύος που δίνεται στα οχήματα για κάθε κατηγορία κάθε ώρα. Η τελευταία γραμμή παρουσιάζει την τιμή ισχύος που παράγουν συνολικά όλες οι μονάδες κάθε ώρα. Όπως είναι προφανές και από το διάγραμμα αλλά και το πρόγραμμα παραγωγής, ο αλγόριθμος οδηγεί το σύστημα να καλύψει την απαιτούμενη ισχύ από τα οχήματα μετά τις 20.00 έως της 5.00 ώστε όλα τα οχήματα να είναι πλήρως φορτισμένα για να ξεκινήσουν τα ταξίδια τους στις 6.00.

#### 4.2.2 Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Μηχανισμού Επιδιόρθωσης για Ηλεκτρικά Οχήματα ( Repair Mechanism for EVs )

Με την διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται το ποσό ισχύος που καλούνται να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες. Η μέθοδος που ακολουθήσαμε στην παρούσα εργασία ορίζει μέσω μιας ημιτονικής συνάρτησης την υπολειπομένη ζήτηση που αντίστοιχη στις συμβατικές μονάδες και εξαρτάται από τον συντελεστή βαρύτητας FD διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα (Delarue E. et al., 2013).

Παρακάτω αναφέρονται τα αποτελέσματα για FD=0, FD=0,5, FD=1, FD=1,5 τιμή του συντελεστή βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα:



With Repair Mechanism 100% FD=0		With Repair Mechanism 100% FD=0.5		With Repair Mechanism 100% FD=1		With Repair Mechanism 100% FD=1.5	
FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000		FES=1000000	
Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values	Runs	ObjF_Values
1	642937	1	457289	1	310115	1	271662
2	642989	2	458866	2	307773	2	269144
3	642944	3	457307	3	310300	3	228194
4	644023	4	457278	4	310166	4	276581
5	642843	5	457284	5	310279	5	269454
6	641810	6	457006	6	310302	6	277001
7	643833	7	457275	7	308691	7	276942
8	642507	8	467781	8	310065	8	271664
9	651042	9	457280	9	308637	9	277038
10	643736	10	457282	10	307072	10	272527
11	642819	11	457273	11	310325	11	269953
12	642900	12	461187	12	307882	12	277140
13	643571	13	457302	13	307667	13	271801
14	643056	14	457264	14	307125	14	272542
15	643577	15	456970	15	307790	15	272672
16	642758	16	457294	16	307134	16	230289
17	643157	17	460961	17	310207	17	269399
18	643487	18	457270	18	307794	18	277364
19	642997	19	457311	19	310177	19	271501
20	643705	20	457289	20	310139	20	277225
Min	641810	Min	456970	Min	307072	Min	228194
Average	643535	Average	458238	Average	308982	Average	269005
Max	651042	Max	467781	Max	310325	Max	277364
Std	1842	Std	2548	Std	1319	Std	13926
Time	8541	Time	11218	Time	16187	Time	18453
Average Time	427	Average Time	561	Average Time	809	Average Time	923
30741 MW		22699 MW		14659 MW		10263 MW	

Όπως είναι προφανές όσο αυξάνουμε την τιμή του συντελεστή βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα τόσο μειώνεται το ποσό ισχύος που πρέπει να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες επομένως και το κόστος παραγωγής ενέργειας.

- Για την περίπτωση όπου έχουμε **FD=0** τότε όλο το ποσό ισχύος που χρειάζεται το σύστημα καλύπτεται μόνο από συμβατικές μονάδες. Έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **641.810 \$**, μέση τιμή 643.535 \$, τυπική απόκλιση 1.842 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 427 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που απαιτείται από το σύστημα 30.741 MW.
- Για την περίπτωση όπου έχουμε **FD=0,5** τότε ένα ποσό ισχύος που χρειάζεται το σύστημα καλύπτεται από συμβατικές μονάδες και από τις ΑΠΕ. Έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **456.970 \$**, μέση τιμή 458.238 \$, τυπική απόκλιση 2.548 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 561 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που απαιτείται από το σύστημα 22.699 MW.
- Για την περίπτωση όπου έχουμε **FD=1** τότε ένα ποσό ισχύος που χρειάζεται το σύστημα καλύπτεται από συμβατικές μονάδες και από τις ΑΠΕ. Έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **307.072 \$**, μέση τιμή 308.982 \$, τυπική απόκλιση 1.319 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 809 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που απαιτείται από το σύστημα 14.659 MW.

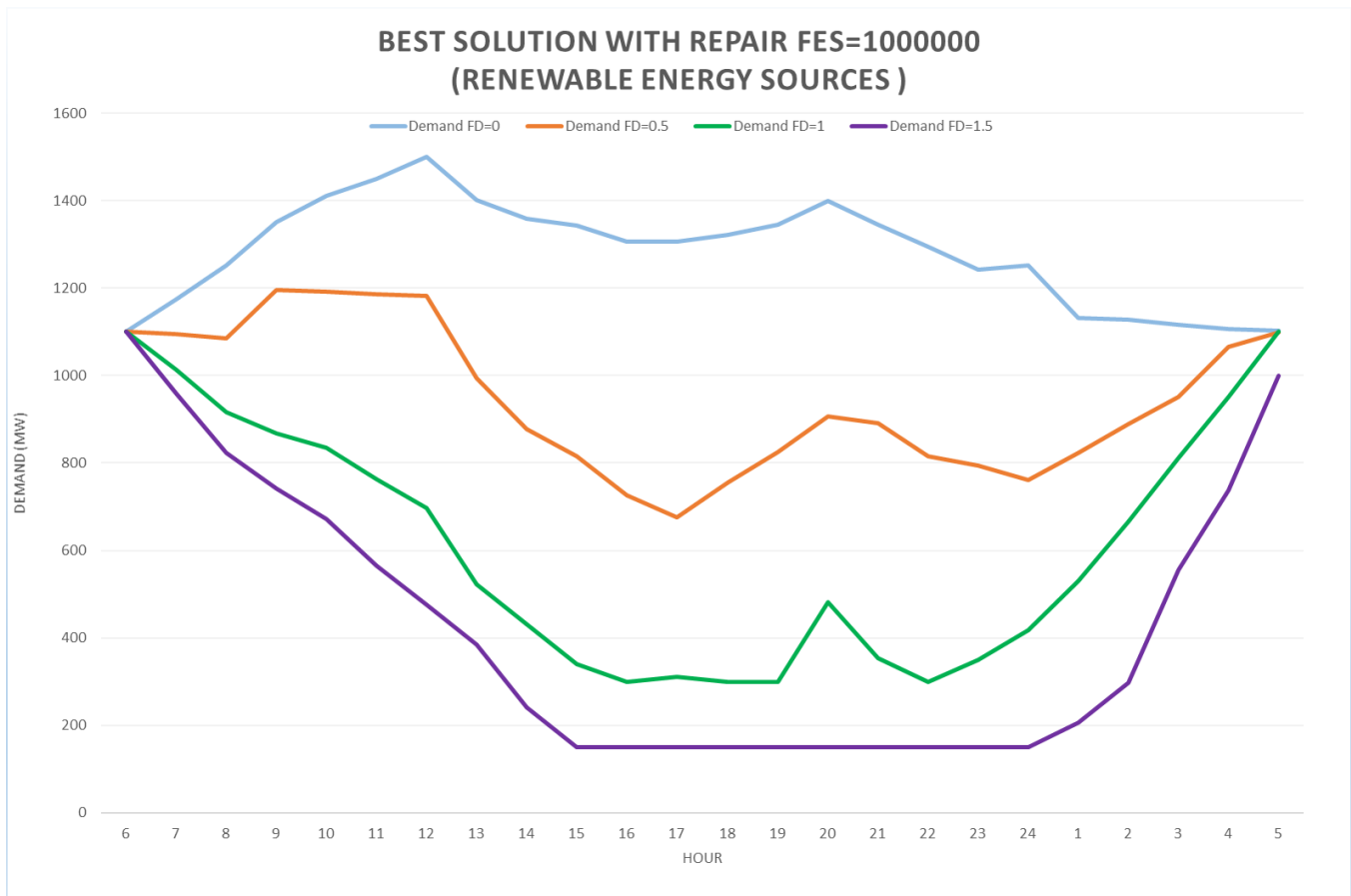
- Για την περίπτωση όπου έχουμε **FD=1,5** τότε ένα ποσό ισχύος που χρειάζεται το σύστημα καλύπτεται από συμβατικές μονάδες και από τις ΑΠΕ. Έχουμε ελάχιστη τιμή κόστους **228.194 \$**, μέση τιμή 269.005 \$, τυπική απόκλιση 13.926 \$, με χρόνο κάθε 'τρέξιματος' 923 δευτερόλεπτα και ποσό ισχύος που απαιτείται από το σύστημα 10.263 MW.

Είναι προφανές ότι όσο αυξάνουμε το συντελεστή FD η τιμή του κόστους ως ελάχιστη αλλά και ως μέση τιμή μειώνεται δραματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ΑΠΕ καλύπτουν όλο ένα και περισσότερο μέρος της ζήτησης ισχύος και οι συμβατικές μονάδες όλο και λιγότερο.

FD	Demand	Min Cost	Average Cost	Min Cost Deference for FD=0	Average Cost Deference for FD=0	Min Cost Deference for FD=0	Average Cost Deference for FD=0	Demand Deference %	Demand Deference
0	30741	641810	643535	0,00%	0,00%	0	0	0,00%	0
0,5	22699	456970	458238	-28,80%	-28,79%	184840	185296	-26,16%	8042
1	14659	307072	308982	-52,16%	-51,99%	334738	334553	-52,31%	16082
1,5	10263	228194	269005	-64,45%	-58,20%	413615	374530	-66,61%	20478

- Για **FD=0,5** έχουμε 28,80% μείωση του ελάχιστου κόστους παραγωγής, 28,79% μείωση του μέσου κόστους παραγωγής και 26,16% μείωση της ποσότητας ισχύος που καλύπτουν οι συμβατικές μονάδες σε σχέση με την περίπτωση για FD=0.
- Για **FD=1** έχουμε 52,16% μείωση του ελάχιστου κόστους παραγωγής, 51,99% μείωση του μέσου κόστους παραγωγής και 52,31% μείωση της ποσότητας ισχύος που καλύπτουν οι συμβατικές μονάδες σε σχέση με την περίπτωση για FD=0.
- Για **FD=1,5** έχουμε 64,45% μείωση του ελάχιστου κόστους παραγωγής, 58,20% μείωση του μέσου κόστους παραγωγής και 66,61% μείωση της ποσότητας ισχύος που καλύπτουν οι συμβατικές μονάδες σε σχέση με την περίπτωση για FD=0.

Επίσης, φαίνεται ότι το σύστημα γίνεται πιο ασταθές όσο αυξάνεται η τιμή του FD γιατί η διαφορά της ελάχιστης και μέσης τιμής κόστους αυξάνεται. Ο αλγόριθμος αναγκάζεται να κλείνει και ανοίγει συχνά μέσα στο 24ωρο τις συμβατικές μονάδες με στόχο να βρει την ελάχιστη δυνατή τιμή κόστους για την ζήτηση που καλούνται να καλύψουν. Αυτό φαίνεται καλύτερα και στο παρακάτω διάγραμμα που απεικονίζεται η παραγομένη ισχύς για την περίπτωση που έχουμε ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κάθε τιμή συντελεστή FD διείσδυσης ΑΠΕ ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση σε ένα 24ωρο αλλά και στα προγράμματα παραγωγής ενέργειας:



Σχήμα 4.8: Παραγομένη ισχύς συστήματος 10 μονάδων για κάθε τιμή συντελεστή FD διείσδυσης ΑΠΕ

Πίνακας 4.6: Πρόγραμμα παραγωγής συστήματος 10 μονάδων για FD=0

Μονάδες /Ωρες	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
2	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
3	51	77	103	129	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	0	0	0	0
4	114	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	25	57	90	122	154	162	162	132	116	117	117	116	122	130	162	130	104	72	82	92	87	77	67	62
6	0	0	20	35	51	67	80	64	48	32	20	20	20	20	33	20	20	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	25	25	25	36	25	25	25	0	0	0	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	10	16	21	10	0	0	0	0	10	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	10	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5	0	3	2	2	0	4	0	0	0	1	0	0	0	1
12	0	1	1	0	3	0	0	0	0	36	12	0	0	0	0	0	9	14	1	0	0	0	0	14
13	0	0	0	1	0	0	0	0	5	84	16	94	13	8	0	5	7	57	9	24	51	35	47	0
14	0	3	5	2	5	0	0	0	1	7	87	4	167	0	0	1	4	31	188	0	23	26	0	40
15	0	11	5	0	0	0	0	0	4	9	0	102	1	0	0	6	57	122	122	286	246	152	0	8
16	0	9	4	1	3	0	0	1	8	2	91	95	0	89	0	3	81	79	85	69	3	0	0	14
17	0	1	36	48	0	0	0	0	41	0	50	8	38	46	0	25	37	39	47	51	54	53	109	24
Total	1100	1174	1253	1351	1411	1450	1500	1401	1359	1344	1307	1306	1322	1345	1400	1345	1294	1242	1252	1132	1127	1117	1107	1102

Πίνακας 4.7: Πρόγραμμα παραγωγής συστήματος 10 μονάδων για  $FD=0.5$

Μοναδες /Ωρες	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
2	455	455	455	455	455	455	455	384	398	335	247	195	275	345	427	412	336	314	281	342	409	455	455	455
3	0	0	0	130	126	120	117	130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	130	130	130	130	130	130	130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130	130
5	40	34	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	42	27	59
6	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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
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
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
11	0	0	0	2	0	0	4	0	1	1	0	0	3	0	0	1	1	0	0	2	1	0	0	4
12	0	1	0	14	0	7	0	1	6	11	1	17	0	19	2	4	1	0	0	2	0	0	0	6
13	0	0	2	3	25	2	16	4	4	37	35	40	20	63	5	1	0	36	20	7	126	1	1	12
14	0	8	4	30	4	1	36	5	10	2	9	12	24	21	0	9	43	45	2	210	66	50	1	1
15	0	0	25	59	27	16	8	10	3	16	77	72	21	2	5	1	82	91	152	124	106	147	81	6
16	0	0	1	1	6	55	9	23	11	22	90	30	85	48	1	49	1	74	86	12	4	1	0	28
17	0	9	1	6	13	1	11	0	33	45	2	52	51	11	12	15	38	50	48	54	53	51	108	42
Total	1100	1094	1085	1195	1191	1185	1182	994	878	815	727	675	755	825	907	892	816	794	761	822	889	952	1067	1099

Πίνακας 4.8: Πρόγραμμα παραγωγής συστήματος 10 μονάδων για  $FD=1$

Μοναδες /Ωρες	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	454	455	455	455	455	372	281	190	150	162	150	150	241	203	150	199	267	357	401	455	455	455
2	455	407	317	265	229	283	243	152	150	150	150	150	150	150	241	150	150	150	150	174	265	356	447	455
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	130	126	120	123	126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130
5	50	25	25	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	61
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
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	0	0	0	0	0
9	10	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
11	0	0	1	2	1	0	0	1	3	0	2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	6
12	0	0	0	0	0	3	0	1	5	7	2	4	5	0	1	2	14	5	1	10	1	3	8	20
13	0	0	3	1	2	2	0	14	1	28	23	20	21	25	25	2	2	8	42	2	80	137	13	8
14	0	5	0	1	0	1	1	1	0	3	44	37	74	38	28	8	35	90	42	148	25	3	1	12
15	0	1	3	1	2	0	0	4	15	51	140	241	44	19	78	14	10	79	118	129	116	51	12	2
16	0	6	0	0	1	0	0	1	28	41	41	56	88	29	29	3	12	52	61	61	82	21	7	17
17	0	1	5	0	0	0	0	1	38	43	50	51	51	53	41	0	6	19	47	52	50	52	110	36
Total	1100	1014	916	868	835	763	698	523	431	340	300	312	300	300	482	354	300	349	417	530	666	811	951	1101

Πίνακας 4.9: Πρόγραμμα παραγωγής συστήματος 10 μονάδων για  $FD=1.5$

Μονάδες /Ωρες	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
1	455	455	433	455	443	391	326	235	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	350	441	455
2	455	364	273	182	150	150	150	150	241	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	206	297	206	297	388
3	44	20	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	121	96	72	60	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130
5	25	25	25	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
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
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	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
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
11	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	1	2	8	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	9	1	18	13	7	2	19	0	0	17	2	1	4	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	17	47	29	98	118	43	34	25	0	19	19	5	5	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	56	36	28	157	41	51	72	2	14	38	74	4	15	5	2	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	11	74	44	91	239	142	97	3	9	33	80	57	136	98	16	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	11	58	96	62	85	87	41	4	15	20	40	45	28	30	13	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	25	52	50	50	53	53	52	25	48	51	46	52	46	52	52	0	0
Total	1100	960	823	742	673	566	476	385	241	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	206	297	556	738	1000

Από τους πίνακες με τα προγράμματα παραγωγής είναι φανερό ότι για κάθε τιμή του συντελεστή  $FD$  ο αλγόριθμος ρυθμίζει με ανάλογο μοναδικό τρόπο το προτεινόμενο μοντέλο παραγωγής ενέργειας.

- Για  $FD=0,5$  χρησιμοποιεί κυρίως τις μονάδες βάσης αλλά και κάποιες ενδιάμεσες μονάδες τις πρωινές ώρες, μόνο την μονάδα 5 έχει ανοιχτή όλο το 24ωρο, για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι τα οχήματα φορτίζονται καθ' όλη την διάρκεια του 24ωρου, όπου σε αντίθεση με  $FD=0$  φορτίζονται κυρίως τις μεσημεριανές και βραδινές ώρες.
- Για  $FD=1$  χρησιμοποιεί μόνο τις μονάδες βάσης αλλά και κάποιες ενδιάμεσες μονάδες (μονάδα 4 και 5) τις πρωινές ώρες για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι τα οχήματα φορτίζονται από τις 13.00 έως τις 5.00.
- Για  $FD=1,5$  χρησιμοποιεί κυρίως τις μονάδες βάσης, με μονιμά ανοιχτή την μονάδα 2 ενώ η μονάδα 1 κλείνει από τις 14.00 έως τις 2.00, αλλά και κάποιες ενδιάμεσες μονάδες τις πρωινές ώρες για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι τα οχήματα φορτίζονται από τις 13.00 έως τις 3.00.

## 5 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την υλοποίηση Εξελικτικού Αλγορίθμου με σκοπό την επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση των Ηλεκτρικών Οχημάτων. Η ενσωμάτωση των ΗΟ πραγματοποιείται μέσω νέων περιορισμών (ισότητας και ανισότητας) και μεταβλητών που αφορούν τα οχήματα και με κριτήρια για την ελαχιστοποίηση του κόστους. Προτείνεται ένα πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας για ένα 24ωρο, από τις 6.00 έως τις 5.00 το άλλο πρωί, με στόχο την πιο αξιόπιστη κάλυψη της σταθερής αλλά και της ζήτησης που επιφέρουν τα οχήματα στο σύστημα.

Η ενσωμάτωση των περιορισμών των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται με τρόπο ώστε να βρίσκεται ο βέλτιστος προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επαναφορτίζονται πλήρως τα οχήματα μέσα σε ένα 24ωρο. Ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων και της κατανομής φορτίου είναι ο ERC-FROFI&EVs. Τελικό ζητούμενο αποτελεί ο καθορισμός του ποσού ισχύος που θα δοθεί στα οχήματα για κάθε κατηγορία για κάθε ώρα και η κάλυψη της συνολικής ζήτησης με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

### 5.1 Μέθοδος με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης – Χωρίς Μηχανισμό Επιδιόρθωσης

Αρχικά, η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος με τον Μηχανισμό Επιδιόρθωσης είναι πολύ πιο σταθερή, παράγει χαμηλότερες τιμές κόστους και καταφέρνει πάντοτε την πλήρη επαναφόρτιση των οχημάτων σε σχέση με την μέθοδο χωρίς τον Μηχανισμό Επιδιόρθωσης. Η ανάγκη για επιπλέον κάλυψη της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων επιφέρει μεγαλύτερες τιμές της αντικειμενικής. Ο αλγόριθμος γίνεται πιο πολύπλοκος, αυξάνονται οι μεταβλητές, θέτονται νέοι περιορισμοί ισότητας και ανισότητάς και αυξάνεται και ο υπολογιστικός χρόνος. Στη περίπτωση της μεθόδου με τον Μηχανισμό Επιδιόρθωσης για 20 ανεξάρτητα 'treξίματα' πήραμε πιο ελπιδοφόρα αποτελέσματα, με καλύτερη ελάχιστη και μέση τιμή κόστους, μικρότερη τυπική απόκλιση και λιγότερο υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με την άλλη μέθοδο. Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι ο αλγόριθμος βρίσκει πάντοτε λύση και ικανοποιεί τους περιορισμούς από τις πρώτες 100 γενεές ενώ στη μέθοδο χωρίς τον μηχανισμό επιδιόρθωσης όσο μειώνουμε την τιμή χαλάρωσης σε ένα βασικό περιορισμό ισότητας ο αλγόριθμος δεν μπορεί πάντοτε να βρει λύση.

### 5.2 Μέθοδος με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης και ποσοστά Διείσδυσης ΗΟ

Ένα άλλο μέρος που αναπτύχθηκε, είναι επίλυση του ΠΔΜ&ΗΟ για διάφορα ποσοστά διείσδυσης των οχημάτων στο σύστημα. Όπως είδαμε, όσο περισσότερο είναι το πλήθος των οχημάτων τόσο πιο σταθερός είναι ο αλγόριθμος επειδή η τιμή της ζήτησης είναι υψηλότερη και ρυθμίζει καλύτερα το κλείσιμο και άνοιγμα των μονάδων μέσα στο 24ωρο. Ενώ, όσο μειώνεται το ποσοστό διείσδυσης αρά τα οχήματα αρά και η ζήτηση έχουμε μεν χαμηλότερο κόστος παραγωγής αλλά η απόκλιση ελάχιστης και μέσης τιμής κόστους και υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται αφού είναι πιο δύσκολο για τον αλγόριθμο να ικανοποίηση όλους τους περιορισμούς για μικρά ποσά ισχύος.

### 5.3 Μέθοδος με Μηχανισμό Επιδιόρθωσης: Perfect Infrastructure – Modest Infrastructure

Μια ακόμα υποενότητα που αναπτύχθηκε είναι αυτή όπου εξετάζονται δυο διαφορετικά σενάρια φόρτισης των ΗΟ. Το πρώτο σενάριο αφορά την φόρτιση των ΗΟ χωρίς χρονικό περιορισμό (Perfect Infrastructure) και το δεύτερο αφορά την φόρτιση των ΗΟ με χρονικό περιορισμό (Modest Infrastructure). Στην περίπτωση Perfect Infrastructure η κοινωνία είναι πλήρως εξοπλισμένη με σταθμούς επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ( στα σπίτια, στους δρόμους, στην εργασία) και έτσι ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει την καλύτερη δυνατή λύση – πρόγραμμα παραγωγής μέσα σε όλο το 24ωρο με στόχο το ελάχιστο δυνατό κόστος. Αντιθέτως, στην περίπτωση Modest Infrastructure σταθμοί επαναφόρτισης υπάρχουν μόνο στο χώρο κατοικίας κάθε κάτοχου ηλεκτρικού οχήματος, οπότε τα ΗΟ μπορούν να επαναφορτίζονται μόνο τις βραδινές ώρες από τις 20.00 έως 5.00 οπότε τότε όλα τα ταξίδια έχουν ολοκληρωθεί και οι κάτοχοι έχουν επιστρέψει στο σημείο έναρξης. Παρατηρήθηκε, ότι το ελάχιστο κόστος, το μέσο κόστος, η τυπική απόκλιση όπως και υπολογιστικός χρόνος αυξήθηκαν στην περίπτωση με περιορισμό χρόνου φόρτισης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι ώρες κάλυψης της ζήτησης ισχύος από τα ΗΟ μειώθηκε και έτσι ο αλγόριθμος περιορίστηκε και αναγκάστηκε να ανοίξει πιο δαπανηρές μονάδες ώστε να καλύψει αυτή τη ζήτηση. Επομένως, η οικονομικότερη και πιο σταθερή περίπτωση κάλυψη της ζήτησης των ΗΟ είναι η Perfect Infrastructure.

### 5.4 Επίδραση Διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα

Η διείσδυση των ΑΠΕ επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην ζήτηση που καλούνται να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες (υπολειπομένη ζήτηση φορτίου) και μειώνουν σημαντικά το κόστος παραγωγής ισχύος. Αυτό συμβαίνει αφού το κόστος παραγωγής των ΑΠΕ είναι πρακτικά μηδενικό, με αποτέλεσμα να έχουν προτεραιότητα έναντι των συμβατικών μονάδων. Παρατηρείται μεγάλη αλλαγή και στα προγράμματα παραγωγής ενέργειας, αφού όσο αυξάνεται ο συντελεστής βαρύτητας διείσδυσης των ΑΠΕ FD τόσο λιγότερη ενέργεια καλύπτουν οι συμβατικές μονάδες αρά τόσο λιγότερο και το κόστος. Βέβαια, όσο αυξάνεται ο συντελεστής αυτός τόσο ο αλγόριθμος γίνεται πιο ασταθής ( η απόκλιση της ελάχιστης και μέσης τιμής κόστους αυξάνεται) αφού λόγω της μεγάλης μείωσης της ζήτησης που πρέπει να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες αναγκάζεται να ανοίγει και κλείνει συχνά μονάδες με υψηλό κόστος εκκίνησης μέσα στο 24ωρο. Επομένως, οι ΑΠΕ βοηθούν στην εξοικονόμηση κόστους παραγωγής ενέργειας αλλά και μείωση των εκπομπών ρύπων από την λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής.

## 6 Επίλογος

Το Πρόβλημα Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων είναι ένας σημαντικά ανερχόμενος κλάδος ερευνάς με πολλές και σημαντικές πρακτικές εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες που απασχολούν και θα απασχολήσουν την επιστημονική κοινωνία. Κάθε κοινωνία και ειδικότερα εταιρία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καλείται να βελτιστοποιήσει το μοντέλο που ακολουθεί με σκοπό την ομαλή ένταξη των ΗΟ στο σύστημα της, την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση εκπομπής ρύπων μέσω της διείσδυσης όλο και περισσότερων ΑΠΕ στην κάλυψη της ζήτησης ισχύος. Στην παρούσα εργασία, προτείνεται ένας αλγόριθμος για την επίλυση του Προβλήματος Δέσμευσης Μονάδων με Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στον αλγόριθμο Διαφορικής Εξέλιξης και κάνει χρήση πραγματικής κωδικοποίησης. Παρουσιάστηκε μια πρωτοποριακή μέθοδος επίλυσης αυτού το προβλήματος με την βοήθεια ενός Μηχανισμού Επιδιόρθωσης που μετέτρεψε τον αρχικό αλγόριθμο σε έναν πολύ πιο σταθερό και με καλύτερα αποτελέσματα αλγόριθμο. Προσδιορίστηκε το πρόγραμμα των μονάδων, τα ποσά παραγομένης ισχύος κάθε ώρα από κάθε μονάδα αλλά και τα ποσά ισχύος που επαναφορτίζονται τα ΗΟ κάθε κατηγορίας για κάθε ώρα με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής σε συνδυασμό με την ικανοποίηση των απαιτούμενων περιορισμών. Το σύστημα επιλύθηκε για μια 24ωρη χρονική περίοδο, από τις 6.00 μέχρι τις 5.00 το επόμενο πρωί, για πλήθος 10 μονάδων παραγωγής με χρήση του ERC – FROFI&EVs. Αποδείχθηκε, ότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι πολύ αξιόπιστο, ευσταθές με πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα ως ελάχιστη και μέση τιμή κόστους αλλά και υπολογιστικού χρόνου. Τέλος, αποδείχθηκε ότι και με την διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα παραγωγής μειώνεται σημαντικά το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας.



## 7 Βιβλιογραφία

Aoki, K., Itoh, M., Satoh, T., Nara, K., & Kanezashi, M. (1989). Optimal long-term unit commitment in large scale systems including fuel constrained thermal and pumped-storage hydro. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(3), 1065-1073.

Arroyo, José M., and Antonio J. Conejo. "Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market." *IEEE Transactions on power systems* 15.3 (2000): 1098-1104.

Arroyo, José Manuel, and Antonio J. Conejo. "A parallel repair genetic algorithm to solve the unit commitment problem." *IEEE Transactions on Power Systems* 17.4 (2002): 1216-1224.

Burns, R. M. "Optimization of priority lists for a unit commitment program." *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, 1975*. 1975.

Chang, Wenping, and Xianjue Luo. "A solution to the unit commitment using hybrid genetic algorithm." *TENCON 2008-2008 IEEE Region 10 Conference*. IEEE, 2008.

Coello, Carlos A. Coello. "Treating constraints as objectives for single-objective evolutionary optimization." *Engineering Optimization+ A35* 32.3 (2000): 275-308.

Cohen, Arthur I., and Miki Yoshimura. "A branch-and-bound algorithm for unit commitment." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 2 (1983): 444-451.

Madzharov, Darin, Erik Delarue, and William D'haeseleer. "Integrating electric vehicles as flexible load in unit commitment modeling." *Energy* 65 (2014): 285-294.

Deb, Kalyanmoy. "An efficient constraint handling method for genetic algorithms." *Computer methods in applied mechanics and engineering* 186.2-4 (2000): 311-338.

Delarue, Erik, Dirk Cattrysse, and William D'haeseleer. "Enhanced priority list unit commitment method for power systems with a high share of renewables." *Electric Power Systems Research* 105 (2013): 115-123.

Dillon, T. S., Edwin, K. W., Kochs, H. D., & Taud, R. J. (1978). Integer programming approach to the problem of optimal unit commitment with probabilistic reserve determination. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (6), 2154-2166.

Fogel, Lawrence J., Alvin J. Owens, and Michael J. Walsh. "Intelligent decision making through a simulation of evolution." *Behavioral science* 11.4 (1966): 253-272.

Glover, Fred. "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence." *Computers & operations research* 13.5 (1986): 533-549.

Hamida, S. Ben, and Marc Schoenauer. "ASCEA: new results using adaptive segregational constraint handling." *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No. 02TH8600)*. Vol. 1. IEEE, 2002.

Hara, K., M. Kimura, and N. Honda. "A method for planning economic unit commitment and maintenance of thermal power systems." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 5 (1966): 427-436.

Holland, John Henry. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.

Juste, K. A., Kita, H., Tanaka, E., & Hasegawa, J. (1999). An evolutionary programming solution to the unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(4), 1452-1459.

Kazarlis, Spyros A., A. G. Bakirtzis, and Vassilios Petridis. "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem." *IEEE transactions on power systems* 11.1 (1996): 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.

Wong, Kit Po, and Zhao Yang Dong. "Differential evolution, an alternative approach to evolutionary algorithm." *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems*. IEEE, 2005.

Clement-Nyns, Kristien, Edwin Haesen, and Johan Driesen. "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid." *Electric Power Systems Research* 81.1 (2011): 185-192.

Lauer, G. S., Sandell, N. R., Bertsekas, D. P., & Posbergh, T. A. (1982). Solution of large-scale optimal unit commitment problems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (1), 79-86.

Lee, Fred N. "Short-term thermal unit commitment-a new method." *IEEE Transactions on Power Systems* 3.2 (1988): 421-428.

Lee, Fred N., Janice Huang, and Rambabu Adapa. "Multi-area unit commitment via sequential method and a DC power flow network model." *IEEE Transactions on Power Systems* 9.1 (1994): 279-287.

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., Youssef L. Abdel-Magid, and Shokri Z. Selim. "A simulated annealing algorithm for unit commitment." *IEEE Transactions on Power Systems* 13.1 (1998): 197-204..

Maturana, Jorge, and María-Cristina Riff. "Solving the short-term electrical generation scheduling problem by an adaptive evolutionary approach." *European Journal of Operational Research* 179.3 (2007): 677-691.

Merlin, André, and Patrick Sandrin. "A new method for unit commitment at Electricite de France." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 5 (1983): 1218-1225.

Mokhtari, Sasan, J. Sing, and Bruce Wollenberg. "A unit commitment expert system (power system control)." *IEEE Transactions on Power Systems* 3.1 (1988): 272-277.

Ouyang, Z., and S. M. Shahidehpour. "Short-term unit commitment expert system." *Electric power systems research* 20.1 (1990): 1-13.

Padhy, Narayana Prasad. "Unit commitment-a bibliographical survey." *IEEE Transactions on power systems* 19.2 (2004): 1196-1205.

Price, Kenneth, Rainer M. Storn, and Jouni A. Lampinen. *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Springer Science & Business Media, 2006.

Nowak, Matthias P., and Werner Römisch. "Stochastic Lagrangian relaxation applied to power scheduling in a hydro-thermal system under uncertainty." *Annals of Operations Research* 100.1-4 (2000): 251-272.

Saravanan, B., Das, S., Sikri, S., & Kothari, D. P. (2013). A solution to the unit commitment problem—a review. *Frontiers in Energy*, 7(2), 223-236.

Shoults, R. R., Chang, S. K., Helmick, S., & Grady, W. M. (1980). A practical approach to unit commitment, economic dispatch and savings allocation for multiple-area pool operation with import/export constraints. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (2), 625-635.

Sisworahardjo, N. S., and A. A. El-Keib. "Unit commitment using the ant colony search algorithm." *LESCOPE'02. 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Conference Proceedings*. IEEE, 2002.

Storn, Rainer, and Kenneth Price. "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces." *Journal of global optimization* 11.4 (1997): 341-359.

Das, Swagatam, and Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan. "Differential evolution: A survey of the state-of-the-art." *IEEE transactions on evolutionary computation* 15.1 (2010): 4-31.

Tong, S. K., S. M. Shahidehpour, and Z. Ouyang. "A heuristic short-term unit commitment." *IEEE Transactions on Power Systems* 6.3 (1991): 1210-1216.

DfT, U. K. "Low carbon transport: A greener future. A carbon reduction strategy for transport." *UK Department for Transport(DfT)*, <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.dft.gov.uk/pgr/sustainable/carbonreduction/low-carbon.pdf> (2009).

Tsalavoutis A. Vasilios, Vrionis G. Constantinos and Tolis I. Athanasios (2017). Optimization of the Unit Commitment Problem with Ramp Rates Using an Enhanced Real Coded Approach.

Tsalavoutis, Vasilios, Constantinos Vrionis, and Athanasios Tolis. "An enhanced real coded approach for the optimization of the unit commitment problem." *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. IEEE, 2016.

Wang, Y., Wang, B. C., Li, H. X., & Yen, G. G. (2015). Incorporating objective function information into the feasibility rule for constrained evolutionary optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(12), 2938-2952.

Wood, Allen J., Bruce F. Wollenberg, and Gerald B. Sheblé. *Power generation, operation, and control*. John Wiley & Sons, 2013.

Wong, K. P., and Y. W. Wong. "Short-term hydrothermal scheduling part. I. Simulated annealing approach." *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution* 141.5 (1994): 497-501.

Xie, Yu-Guang, and Hsiao-Dong Chiang. "A novel solution methodology for solving large-scale thermal unit commitment problems." *Electric Power Components and Systems* 38.14 (2010): 1615-1634.

Yamin, Hatim Y. "Review on methods of generation scheduling in electric power systems." *Electric Power Systems Research* 69.2-3 (2004): 227-248.

Yu, Derong, Yongqiang Wang, and Rui Guo. "A hybrid ant colony optimization algorithm based Lambda-iteration method for unit commitment problem." *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*. Vol. 1. IEEE, 2010.

Zhang, Xiaohua, Jinqian Zhao, and Xingying Chen. "A hybrid method of Lagrangian relaxation and genetic algorithm for solving UC problem." *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. IEEE, 2009.

Yang, Zhile, Kang Li, and Aoife Foley. "Computational scheduling methods for integrating plug-in electric vehicles with power systems: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (2015): 396-416.

Yang, Z., Li, K., Guo, Y., Feng, S., Niu, Q., Xue, Y., & Foley, A. (2019). A binary symmetric based hybrid meta-heuristic method for solving mixed integer unit commitment problem integrating with significant plug-in electric vehicles. *Energy*, 170, 889-905.

Πλατανιώτης Δημήτριος-Ανδρέας. (2018). *Εφαρμογή Εξελικτικού Αλγόριθμου για την Εκτίμηση της Στρεφομένης Εφεδρείας μέσω των Δεικτών Αξιοπιστίας του Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας*.

Σπανός Αλέξανδρος. (2019). *Χρήση μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με διεύθυνση ενέργειας παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές*.