



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ  
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΕΡΕΥΝΑΣ**

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Γεώργιος Δούνιας

**Συνεπίβλεψη:** Δρ. Αλέξανδρος Τζανέτος

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΝΤΑΡΔΑΣ**

**Διοίκηση Έργων και Νοήμονες Υπολογιστικές Τεχνικές  
(Project Management and Intelligent Computational Techniques)**

Χίος, Οκτώβριος 2020

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της Διπλωματικής Εργασίας, Καθηγητή κ. Γ. Δούνια για την πολύτιμη καθοδήγηση και την επίβλεψη που προσέφερε σε όλα τα στάδια της εκπαιδευτικής διαδικασίας, από τα μαθήματα στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Διπλώματος έως την συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Σε όλα τα βήματα καθοριστική ήταν η συμβολή του Δρ. Α. Τζανέτου με την αδιάκοπη επιμέλεια της ερευνητικής διαδικασίας και την συνεχή υποστήριξη που παρείχε σε όλα τα επίπεδα, για την οποία είμαι ευγνώμων.

Ως προς την γραμματειακή και τεχνολογική υποστήριξη, θα ήθελα να αποδώσω συγχαρητήρια στο διοικητικό προσωπικό του Τμήματος Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Η παρούσα προσπάθεια αφιερώνεται στην οικογένεια μου ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης για την συμπαράσταση και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν.

## Δήλωση περί Πνευματικών Δικαιωμάτων

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής διπλωματικών εργασιών του ΤΜΟΔ. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Ο δηλών

Δημήτριος Ντάρδας

## Στόχος

Η παρούσα εργασία συντάχθηκε στο πλαίσιο της εκπαιδευτικής διαδικασίας που οδηγεί στην λήψη Μεταπτυχιακού Διπλώματος Μηχανικών Οικονομίας Διοίκησης μέσω Έρευνας (ΜΕΔΜΟΔΕ), του Τμήματος Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης, με έδρα την Χίο, το οποίο ανήκει στην Πολυτεχνική Σχολή του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Αποτελεί την Μεταπτυχιακή Εργασία για την απόκτηση Διπλώματος Ειδίκευσης με τίτλο Διοίκηση Έργων και Νοήμονες Υπολογιστικές Τεχνικές (Project Management and Intelligent Computational Techniques).

Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής Αλγορίθμων Εμπνευσμένων από την Φύση (Nature Inspired Algorithms) στην επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της Εξομάλυνσης Πόρων (Resource Leveling) σε πραγματικά έργα. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε η εφαρμογή της μεθόδου της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό (Sonar Inspired Optimization) για να χρησιμοποιηθεί στην εξομάλυνση των προφίλ πόρων που απαιτούνται για κάθε εργασία προς εκτέλεση σε δύο πραγματικά έργα κατασκευής υποδομών ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για ένα έργο Κατασκευής Υποσταθμού Υψηλής Τάσης και ένα έργο Κατασκευής Τερματικού Σταθμού Υποθαλάσσιας Διασύνδεσης Νήσου με το Ηπειρωτικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Για τον ίδιο σκοπό, εφαρμόστηκε και ένα υβριδικό σχήμα που συνδυάζει τις μεθόδους της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό και της Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing) ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή της αρχικής μεθόδου.

## Περίληψη

Η κατασκευή τεχνικών έργων είναι μία άκρως απαιτητική διαδικασία που την ξεχωρίζει από τις περισσότερες διαδικασίες που θεωρούνται ως έργα. Η πλειοψηφία των επιμέρους δραστηριοτήτων οι οποίες συνθέτουν ένα τεχνικό κατασκευαστικό έργο εκτελούνται για μεγάλο χρόνο σε εξωτερικό χώρο ή υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες εισάγοντας μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας στην υλοποίηση του χρονοπρογραμματισμού. Συχνά, στους εξωτερικούς απρόβλεπτους παράγοντες που δύνανται να επηρεάσουν την εξέλιξη ενός κατασκευαστικού έργου προστίθενται και οικονομικοί περιορισμοί είτε ως αποτέλεσμα αναπροσαρμογών στον χρονοπρογραμματισμό είτε λόγω τεχνικών αλλαγών που επιβάλλονται από την εξέλιξη του έργου.

Τα τεχνικά έργα κατασκευής είναι μοναδικά ως προς τον σχεδιασμό και την υλοποίησή τους, αφού κάθε ένα ξεχωριστά υλοποιείται σε διαφορετικό περιβάλλον και εξελίσσεται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, ενώ έως την ολοκλήρωσή τους μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι εργασίες που απαρτίζουν τα τεχνικά έργα είναι κατασκευαστικής φύσης, κάτι που σημαίνει ότι αφενός έχουν συχνά μεγάλη διάρκεια και αφετέρου απαιτούν τα ίδια ή παρόμοια είδη πόρων για την εκτέλεσή τους, είτε πρόκειται για προσωπικό είτε για τεχνικό εξοπλισμό. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του χρονοπρογραμματισμού ώστε να γίνεται ορθή διάθεση των πόρων σε όλο το φάσμα εξέλιξης του έργου. Αν και οι επιμέρους εργασίες είναι διακριτές μεταξύ τους, υπάρχει αλληλεξάρτηση καθώς αποτελούν τα διαδοχικά μακρά στάδια μίας κατασκευής κάτι που επιτρέπει συνήθως σε αρκετές εργασίες να μπορέσουν να εκτελούνται τμηματικά ή με μεταβαλλόμενο ρυθμό κατά την συνολικά προβλεπόμενη επιτρεπτή διάρκεια τους. Οπότε στην πράξη, κατά την εκτέλεση των έργων απαιτούνται διαφορετικά ποσά πόρων ανά ημέρα εκτέλεσης έργου και επειδή τα εργοτάξια που αποτελούν το πεδίο εξέλιξης των εργασιών είναι προσωρινές μη σταθερές κατασκευές, πρέπει να γίνεται προσπάθεια η μέση χρήση πόρων να παραμένει όσο δυνατόν σταθερή ώστε να μην προκύπτει οικονομική και χρονική επιβάρυνση του έργου από την μεταφορά πόρων από και προς το εργοτάξιο.

Η Διαχείριση Πόρων ως αντικείμενο του επιστημονικού πεδίου της Διοίκησης Έργων στοχεύει στην βελτίωση της διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων. Η Εξομάλυνση Πόρων ένα πιο εξειδικευμένο πεδίο που πραγματεύεται τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί μία ομοιόμορφη χρήση πόρων για δεδομένη σταθερή διάρκεια έργου. Στην ουσία πρέπει να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις ώστε να ακολουθηθεί η βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης των πόρων για να εξυπηρετηθεί ο σκοπός της έγκαιρης ολοκλήρωσης ενός έργου με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου ο λήπτης των αποφάσεων πρέπει να επιλέξει την καλύτερη απόφαση. Αρωγός σε αυτήν την προσπάθεια υπήρξε η Τεχνητή Νοημοσύνη, η οποία παρείχε τα πρώτα υποστηρικτικά εργαλεία προς τον λήπτη αποφάσεων ήδη από το δεύτερο μισό του προηγούμενου αιώνα.

Η εξέλιξη της Τεχνητής Νοημοσύνης, σε κάθε βήμα της προσέφερε και νέες βοήθειες ως προς το πρόβλημα της εξομάλυνσης πόρων σε έργα. Η εμφάνιση των Εξελικτικών Αλγορίθμων και η επιτυχία τους στην αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης έδωσε περαιτέρω ώθηση στην εφαρμογή νέων τεχνικών που χρησιμοποιούν Νοήμονες Υπολογιστικές Μεθόδους για να επιλύσουν προβλήματα. Σε αυτή την κατηγορία αναπτύχθηκαν πρόσφατα οι Νοήμονες Μέθοδοι Εμπνευσμένες από την Φύση οι οποίες αποδείχτηκαν εξαιρετικά αποτελεσματικές στην επίλυση δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της εξομάλυνσης πόρων σε έργα δεν έχει λυθεί με ακρίβεια για έργα μεγάλης πολυπλοκότητας. Στη βιβλιογραφία απαντώνται ακριβείς λύσεις για μικρά έργα (<20 δραστηριοτήτων), ενώ για έργα μεσαίου μεγέθους (μέχρι 50 δραστηριότητες) και για έργα με ιδιαιτερότητες όπως η μεγάλη διάρκεια εργασιών και οι σχέσεις εξάρτησης, όπως για παράδειγμα οι Start – Start, Start – Finish εξαρτήσεις (SS, SF) κλπ, παρουσιάζονται κάποιες καλές προσεγγιστικές λύσεις. Τα έργα που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιβλιογραφία είναι τεχνητά και λίγες είναι οι επιτυχείς προσπάθειες εξομάλυνσης πόρων σε πραγματικά έργα.

Στην παρούσα εργασία επιτυγχάνονται βελτιωμένες προσεγγιστικές λύσεις σε δύο πραγματικά έργα μεσαίου μεγέθους εφαρμόζοντας μία Νοήμονα Υπολογιστική Μέθοδο εμπνευσμένη από τον Φυσικό Κόσμο, την Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό.

Όσον αφορά την μεθοδολογία, διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα στην επίλυση του προβλήματος Εξομάλυνσης Πόρων, σε πραγματικά έργα κατασκευής, μίας νοήμονος τεχνικής εμπνευσμένη από τη φύση, της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό. Ο εν λόγω αλγόριθμος παράγει εφικτές εναλλακτικές χρονικές ενάρξεις για τις δραστηριότητες των κατασκευαστικών έργων που μελετήθηκαν ώστε να σχηματιστούν καλύτερα προφίλ πόρων για τις δραστηριότητες. Για την αξιολόγηση των προφίλ πόρων χρησιμοποιήθηκαν οι αποτελεσματικότερες βιβλιογραφικά γνωστές συναρτήσεις αξιολόγησης ως προς την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων πόρων και την δημιουργία προφίλ όπου μειώνεται η απόκλιση χρήσης πόρων από δραστηριότητες σε σχέση με την μέση χρήση.

Επιπλέον, εφαρμόστηκε και υβριδικό σχήμα που περιέχει την προαναφερόμενη μέθοδο αλλά ενσωματώνει και στοιχεία της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing), η οποία είναι επίσης μια Νοήμων Υπολογιστική Μέθοδος Εμπνευσμένη από τον Φυσικό Κόσμο,

*Δημήτριος Ντάρδας*

*Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου*

---

ώστε να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του συνδυασμού των δύο μεθόδων όταν χρησιμοποιούνται στα ίδια δεδομένα.

## **ABSTRACT**

Constructional projects include most of the times very demanding processes and are generally more complicated than other kind of projects. The majority of the individual activities that compose a technical construction project are carried out for a long time outdoors or under variable environmental conditions, introducing a high degree of uncertainty in the implementation of time scheduling. Often, financial constraints are added to the external unforeseen factors that may affect the development of a construction project, either as a result of schedule adjustments or due to technical changes imposed by the development of the project.

The constructional projects are unique in terms of their design and implementation since each one is implemented separately in a different environment and evolves in different periods of time while their completion takes a long time. They are consisted of constructional activities meaning that on the one hand they are often long-lasting and on the other hand they require the same or similar types of resources such as staff or equipment in order to be executed. These characteristics should be taken into account during the initial design in order to properly allocate resources throughout the project development range.

Although the individual tasks are distinct, there is interdependence between them as they are interlinked to successive long stages that are part of the same construction process, something that usually allows several tasks to be executed in time interval periods or at a variable rate during their total allowable duration. In real word, the execution of projects requires different amounts of resources per day of project execution. Since the construction site is a temporary and variable environment, efforts should be made to keep the average resource usage of resources as stable as possible so that no financial and time burden is introduced to the total cost of the project due to the need of transferring resources to the construction site.

Project Management and specifically Resource Management aims to improve the management of available resources. Resource Leveling is the field that deals with the ways in which a uniform use of resources can be achieved for a given fixed project duration. In essence, the right decisions must be made in order to follow the best resource management strategy and serve the purpose of completing a project on time at the lowest possible cost.

This is an optimization problem where the decision maker has to choose the best decision. Artificial Intelligence provided the first supportive tools to the decision maker since the second half of the twentieth century. The evolution of Artificial Intelligence, gradually offered new tools in Resource Leveling of projects. The success of Evolutionary Algorithms in optimizing problems has given further boost to the application of new techniques that use Intelligent Computational Methods to solve problems. The Nature-Inspired Intelligent Methods



which have recently been developed in this category, are proven to be extremely effective in solving difficult optimization problems.

Optimizing the usage of resources in complex projects is a problem which is not yet provided with an optimum solution. In bibliography, there are accurate solutions for small projects while approximate solutions are presented for medium-sized projects including particularities, such as the long duration of tasks or the correlations between them. The projects used for optimization are usually artificial and there are few successful resource smoothing efforts in real projects.

In the present document, improved approximate solutions are achieved in two real medium-sized projects by applying an Intelligent Computational Method inspired by the Nature, called Sonar Inspired Optimization.

The algorithm of Sonar Inspired Optimization method generates feasible alternative starting times for the activities of the construction projects studied in order to form better resource profiles. The most effective evaluation functions were used to evaluate the resource profiles in terms of minimizing the required resources and creating a profile with a minimized deviation of resource usage from activities in relation to the average use.

In addition, a hybrid scheme was used containing the aforementioned method but also incorporating elements of Simulated Annealing, which is also an Intelligent Computational Method Inspired by the Nature in order to test the effectiveness when combining the two methods used in the same data.

## Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....</b>	<b>10</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>11</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</b>	<b>12</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΨΕΥΔΟΚΩΔΙΚΩΝ.....</b>	<b>12</b>
1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ.....	14
1.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΦΥΣΗ.....	14
2.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΟΙ ΑΠΟ ΤΗ ΦΥΣΗ.....	16
2.2 ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΗ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΝΟΜΟΥΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ (ΝΕΕΦΦΝΕ).....	17
2.3 ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΦΥΣΗ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ .....	17
2.4 ΚΙΝΗΤΡΑ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	19
3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	22
3.1.1 Παρουσίαση Δεδομένων.....	22
3.1.2 Επεξεργασία δεδομένων.....	25
3.2 ΈΡΓΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΝΗΣΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΗΠΕΙΡΩΤΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ .....	29
3.2.1 Παρουσίαση Δεδομένων Έργου Διασύνδεσης ΜΑΝ με τον ΕΣΜΗΕ .....	33
3.2.2 Επεξεργασία Δεδομένων Έργου Κατασκευής Τερματικού Σταθμού.....	35
4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	40
4.2 ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΠΟΡΩΝ .....	40
4.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ .....	40
4.4 ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΠΟΡΩΝ .....	40
4.4.1 Αναλυτική επίλυση του προβλήματος Εξομάλυνσης Πόρων.....	41
4.4.2 Άλλες Μέθοδοι Επίλυσης Προβλημάτων Εξομάλυνσης Πόρων.....	42
4.5 ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΕΣ ΣΕ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ.....	43
4.6 ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΧΩΡΟΥ ΛΥΣΕΩΝ .....	43
4.6.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	43
4.6.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση.....	44
5.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΧΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟ (SONAR INSPIRED OPTIMIZATION) .	48
5.2 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΧΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΧΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟ (SONAR INSPIRED OPTIMIZATION - SIO) ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ (SIMULATED ANNEALING- SA).....	51
6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ .....	53
6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΈΡΓΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ .....	60
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>72</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1α,β,γ: Διάγραμμα δομής ανάλυσης εργασιών (WBS) Υ/Σ .....	28
Εικόνα 2α,β,γ: Διάγραμμα ανάλυσης ροής εργασιών WBS ΤΣ.....	39
Εικόνα 3 : Προφίλ Πόρων Νωρίτερης Έναρξης Δραστηριοτήτων (Εκατοστιαία Ημερήσια Χρήση) .....	54
Εικόνα 4: Προφίλ Πόρων Αργότερης Έναρξης Δραστηριοτήτων (Εκατοστιαία Ημερήσια Χρήση) .....	54
Εικόνα 5: Συγκριτικές κατανομές μεθόδου SIO και SIO-SA για το Κριτήριο RLI.....	57
Εικόνα 6: Σύγκριση των Προφίλ Πόρων που δημιουργούνται από την Νωρίτερη Έναρξη (ES Profile), Αργότερη Έναρξη (LS Profile) και από την εφαρμογή της ΒΕΗ-ΠΑ (100-50) .....	58
Εικόνα 7 : Συγκριτικές κατανομές μεθόδου SIO και SIO-SA για το Κριτήριο Gf.....	59
Εικόνα 8: Προφίλ Πόρων Νωρίτερης Έναρξης Δραστηριοτήτων Κατασκευής Τερματικού Σταθμού.....	60
Εικόνα 9: Προφίλ Πόρων Αργότερης Έναρξης Δραστηριοτήτων Κατασκευής Τερματικού Σταθμού.....	61
Εικόνα 10: Σύγκρισης Καλύτερων Προφίλ βασισμένα στο RLI .....	63
Εικόνα 11: Σύγκρισης Καλύτερων Προφίλ βασισμένα στο Gf.....	64

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εργασίες με χρήση πραγματικών δεδομένων .....	18
Πίνακας 2: Εγκατεστημένη Ισχύς Σταθμών Παραγωγής .....	21
Πίνακας 3: Αναλυτική λίστα δραστηριοτήτων έργου Κατασκευής Υποσταθμών Ενέργειας. 23	
Πίνακας 4: Δραστηριότητες Κατασκευής Υ/Σ (Διάρκειες Εργασιών και Εξαρτήσεις) .....	26
Πίνακας 5: Συμβατικοί Σταθμοί Παραγωγής .....	29
Πίνακας 6: Δραστηριότητες τερματικού σταθμού .....	34
Πίνακας 7: Δραστηριότητες Κατασκευής ΤΣ (Διάρκειες Εργασιών και Εξαρτήσεις) .....	35
Πίνακας 8: Τελική μορφή δεδομένων προβλήματος.....	53
Πίνακας 9. Αξιολόγηση Λύσεων ES και LS .....	55
Πίνακας 10: Τιμές των παραμέτρων της ΒΕΗ και του Υβριδικού Σχήματος ΒΕΗ-ΠΑ .....	55
Πίνακας 11: Αποτελέσματα ΒΕΗ και ΒΕΗ-ΠΑ για το κριτήριο RLI.....	56
Πίνακας 12: Αποτελέσματα ΒΕΗ και ΒΕΗ-ΠΑ για το κριτήριο Gf.....	56
Πίνακας 13: Δεδομένα Εργασιών Κατασκευής Τερματικού Σταθμού: Τελική μορφή δεδομένων προβλήματος .....	60
Πίνακας 14: Αξιολόγηση ES-LS ανά Κριτήριο .....	61
Πίνακας 15: Τιμές των παραμέτρων της ΒΕΗ και του Υβριδικού Σχήματος ΒΕΗ-ΠΑ .....	61
Πίνακας 16: Αποτελέσματα ΒΕΗ και ΒΕΗ-ΠΑ για το κριτήριο RLI.....	62
Πίνακας 17 : Αποτελέσματα ΒΕΗ και ΒΕΗ-ΠΑ για το κριτήριο Gf.....	62

## Κατάλογος Ψευδοκωδίκων

Ψευδοκώδικας 1: Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό.....	50
Ψευδοκώδικας 2. Υβριδικού Σχήματος ΒΕΗ-ΠΑ.....	52

## 1. Εισαγωγή

Αποτελεί διαχρονικό στόχο των Διαχειριστών Έργων η εκτέλεση των εργασιών οι οποίες συνθέτουν κάθε έργο με τρόπο που θα μειώνει το συνολικό κόστος διασφαλίζοντας παράλληλα την ποιότητα κατασκευής.

Η κατασκευή τεχνικών έργων είναι συνυφασμένη με την ανθρώπινη εξέλιξη, καθώς η ανακάλυψη των πρώτων εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο έδωσε την δυνατότητα της χρήσης τους ως βοηθήματα για την αποδοτικότερη εκτέλεση εργασιών, οι οποίες πραγματοποιούνταν κυρίως με χρήση της μυϊκής δύναμης.

Η εξέλιξη του ανθρώπινου είδους συνδέθηκε με την εξέλιξη των εργαλείων που χρησιμοποιούνταν για την εκτέλεση των καθημερινών εργασιών, που αρχικά αφορούσε πρωταρχικές βασικές ανάγκες. Σταδιακά, η οργάνωση των ανθρώπινων κοινωνιών με την συγκέντρωση αρκετών μελών σε περιορισμένο χώρο έκανε επιτακτική την ανάγκη εκτέλεσης εργασιών που αφορούν μεγαλύτερο πλήθος μελών της. Με αυτόν τον τρόπο, η αρχική αναζήτηση τροφής από ένα άτομο που χρησιμοποιούσε ένα εργαλείο, εξελίχθηκε στην υλοποίηση τεχνικών έργων που αποτελούνται από πολλές εργασίες εκτελούμενες από πλειάδα ανθρώπων, χρησιμοποιώντας μεγάλο πλήθος εργαλείων και τεχνικών μέσων ενώ πλέον σπάνια τα τεχνικά έργα κατασκευάζονται για να καλυφθούν οι ανάγκες ευρύτερου τμήματος της κοινωνίας σε σχέση με τους εμπλεκόμενους στην κατασκευή αυτών.

Η διαρκής προσπάθεια για έλεγχο και συντονισμό όλων των εργασιών ώστε να επιτευχθεί καλύτερο αποτέλεσμα έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξη της Διοίκησης Έργων. Η Διοίκηση Πόρων, ως τμήμα της Διοίκησης Έργων, εστιάζει στους τρόπους χρησιμοποίησης των απαραίτητων πόρων για την εκτέλεση όλων των εργασιών που απαρτίζουν ένα έργο, όπως το ανθρώπινο δυναμικό και ο μηχανολογικός εξοπλισμός.

Η βελτίωση του τρόπου χρησιμοποίησης των πόρων αποτελεί αντικείμενο της τεχνικής Κατανομής Πόρων (Resource Allocation) η οποία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της χρονικής διάρκειας χρησιμοποίησης πόρων μέσω του Προγραμματισμού Πόρων (Resource Scheduling) και στην ομοιόμορφη χρήση πόρων για δεδομένη σταθερή διάρκεια έργου μέσω της Εξομάλυνσης Πόρων (Resource Leveling).

Εξετάζοντας την Βιβλιογραφία, η Εξομάλυνση Πόρων σε τεχνικά έργα επιχειρήθηκε να εφαρμοστεί με χρήση μαθηματικών προσεγγίσεων οι οποίες ήταν αποδοτικές σε περιορισμένου μεγέθους έργα. Σε αυξανόμενης πολυπλοκότητας έργα χρησιμοποιήθηκαν ευρετικές μέθοδοι, ανάλογες με τις ιδιαιτερότητες του κάθε έργου, εξασφαλίζοντας σε μεγάλο βαθμό την εύρεση λύσεων που αφορούσαν τα συγκεκριμένα έργα. Πιο πρόσφατα, εφαρμόστηκαν εξελικτικές

προσεγγίσεις (Εξελικτικοί Αλγόριθμοι), οι οποίες βελτιώνουν ικανοποιητικά την ομοιομορφία χρησιμοποίησης των πόρων.

### **1.1 Υπολογιστική Νοημοσύνη**

Η απαρχή ανάπτυξης της Υπολογιστικής Νοημοσύνης βασίστηκε στην παρατήρηση ότι ο υπολογιστής μπορεί να επεξεργαστεί μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας σε σχέση με την ανθρώπινη νόηση. Έτσι εξελίχθηκαν υπολογιστικά συστήματα ανταγωνιστικά ως προς την αποτελεσματικότητά τους με την ανθρώπινη νοημοσύνη.

Η ισχυρή θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών υπήρξε έμπνευση για την δημιουργία Εξελικτικών Αλγορίθμων των οποίων η εφαρμογή εστιάστηκε σε πολύπλοκα προβλήματα. Εμφανίστηκαν μέθοδοι που χρησιμοποιούν Εξελικτικούς Αλγορίθμους για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης ενώ όταν διαφοροποιούνταν το πεδίο εφαρμογής τους, ανάλογα με την φύση των προβλημάτων που βελτιστοποιούνταν, παρατηρήθηκε αυξημένη αποτελεσματικότητα όταν συνδυάζονταν διάφορες τεχνικές όπου συνεργάζονταν διαφορετικές μέθοδοι Υπολογιστικής Νοημοσύνης, παράγοντας Υβριδικά Σχήματα (Hybrid Schemes).

### **1.2 Υπολογιστικές Μέθοδοι Εμπνευσμένες από την Φύση**

Πηγή έμπνευσης για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης υπήρξαν και οι στρατηγικές που ακολουθούν οργανισμοί στην φύση κατά την διάρκεια βασικών λειτουργιών τους όπως η εύρεση τροφής και οι οποίες αποδεικνύονται αρκετά αποτελεσματικές για τους οργανισμούς. Οπότε οι Υπολογιστικές Μέθοδοι Εμπνευσμένες από την Φύση (Nature Inspired Computational Methods) δομώντας την λειτουργία τους πάνω στο ίδιο μοντέλο, το οποίο επιτυχημένα χρησιμοποιούν οι οργανισμοί για την ικανοποίηση των εκτελούμενων εργασιών τους, επιδιώκουν να επιλύσουν ικανοποιητικώς προβλήματα βελτιστοποίησης.

Η παρατήρηση των φυσικών μηχανισμών αποτέλεσαν επίσης έμπνευση για την ραγδαία εμφάνιση Νοημόνων Μεθόδων Εμπνευσμένων από τα Φαινόμενα της Φύσης (Nature Inspired Intelligent Methods) οι οποίες χρησιμοποίησαν Αλγόριθμους Εμπνευσμένους από την Φύση (Nature Inspired Algorithms) όπως αυτός της Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing).

Οι μέθοδοι κατατάσσονται αρχικά με κριτήριο την πηγή έμπνευσης τους σε τέσσερις κατηγορίες (Fister et al., 2013):

1. Νοημοσύνη Σμήνους (Swarm Intelligence)
2. Βιο-εμπνευσμένα Σχήματα (Bio-Inspired)
3. Εμπνευσμένες από Φυσική και Χημεία

#### 4 . Μη εντασσόμενες σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες

Την πρώτη κατηγορία την απαρτίζουν μέθοδοι που προσομοιώνουν την συλλογική συμπεριφορά ζώντων οργανισμών, ενώ στην δεύτερη εντάσσονται μέθοδοι που αντλούν έμπνευση από ενέργειες οι οποίες εκτελούνται από στοιχεία της χλωρίδας και της πανίδας χωρίς όμως να εμφανίζεται συλλογική συμπεριφορά (collective behavior).

Η τρίτη κατηγορία απαρτίζεται από μεθόδους οι οποίες εμπνεύστηκαν από φαινόμενα που αποτελούν αντικείμενα θετικών επιστημών όπως η Φυσική και η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει όλες τις υπόλοιπες μεθόδους που δεν εντάσσονται αποκλειστικά σε μία εκ των προαναφερομένων τριών κατηγοριών.

## 2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

### 2.1 Αλγόριθμοι Εμπνευσμένοι από τη Φύση

Στην διεθνή βιβλιογραφία, η πρώτη εμφάνιση της έννοιας του Εξελικτικού Υπολογισμού (Evolutionary Computing) και των Εξελικτικών Αλγόριθμων έγινε αρκετά πρόσφατα (Back, Fogel and Michalewicz, 1997). Η ορολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε για να περιγραφούν μέθοδοι οι οποίες είναι εμπνευσμένες από την Δαρβινική θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών.

Βασικός εκπρόσωπος της κατηγορίας είναι ο Γενετικός Αλγόριθμος (Holland, 1992b) ενώ στην θεωρία των Γενετικών Αλγορίθμων βασίστηκε και ο Γενετικός Προγραμματισμός (Genetic Programming) (Koza, 1992) που αποτελεί ευρέως γνωστή μέθοδο Εξελικτικού Υπολογισμού.

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης και αυτό οδήγησε στην εμφάνιση αυξανόμενου αριθμού νέων μεθόδων που ανήκουν στην κατηγορία αυτή. Η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing) (Kirikpatrick, Gelatt and Vecchi, 1983) και η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) (Eberhart and Kennedy, 1995) άντλησαν έμπνευση από φυσικά φαινόμενα όπως το φαινόμενο της ανόπτησης και από συλλογικές συμπεριφορές έμβιων όντων που λαμβάνουν χώρα στη φύση και αποτέλεσαν την βάση για την ανάπτυξη άλλων μεθόδων που αντλούσαν έμπνευση από τον ίδιο χώρο, δημιουργώντας την κατηγορία των Νοημόνων Μεθόδων Εμπνευσμένων από Φαινόμενα της Φύσης (Nature Inspired Algorithms).

Πρόσφατα έγινε σαφέστερη ομαδοποίηση των υπάρχουσών μεθόδων και οι αλγόριθμοι που εμπνέονται από την Φύση μπορούν να ενταχθούν σε μία εκ των τριών επόμενων κατηγοριών (Tzanetos et al., 2018):

1. Νοημοσύνη Σμήνους (Swarm Intelligence)
2. Αλγόριθμοι Εμπνευσμένοι από Οργανισμούς (Organisms-based)
3. Αλγόριθμοι Εμπνευσμένοι από Φυσικά Φαινόμενα και Νόμους των Επιστημών  
(Physical Phenomena and Laws of Science)



## **2.2 Νοημοσύνη Εμπνευσμένη από Φυσικά Φαινόμενα και Νόμους των Επιστημών (NEEΦΦNE)**

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται αλγόριθμοι που αντλούν έμπνευση από νόμους ή από φυσικά φαινόμενα που αποτελούν ευρύτερο αντικείμενο μελέτης Επιστημών όπως η Φυσική, η Χημεία, η Μηχανική και διέπονται από τους νόμους των επιστημών τους αντίστοιχα (Τζανέτος Α., 2020).

Επιτυχημένο παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι ο Αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing). Αντλεί έμπνευση από την Επιστήμη της Μεταλλουργίας στην οποία περιγράφεται το φαινόμενο της ανόπτησης όπου κατά την τελική επεξεργασία παραγόμενου μετάλλου, η πολύ θερμή επιφάνεια του ψύχεται ελεγχόμενα με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του και την δημιουργία πιο λείας επιφάνειας.

Η πρόσφατη ραγδαία αύξηση εμφάνισης Αλγορίθμων Εμπνευσμένων από την Φύση αποκάλυψε και μία άλλη τάση. Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας συνήθως εφαρμόζονταν και σε πραγματικά προβλήματα και όχι απλά σε συναρτήσεις ελέγχου (benchmark functions).

## **2.3 Χρήση Αλγορίθμων Εμπνευσμένων από τη Φύση στο πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων**

Στην Επιστήμη των Υπολογιστών τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο κατατάσσονται στην κλάση P ενώ αντίστοιχα τα προβλήματα που δεν μπορούν να επιλυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο αποτελούν μέρος της κλάσης NP. Έχουν εισαχθεί αρκετές υποκατηγορίες της κλάσης NP όπως τα NP-δυσμενή (NP-hard) προβλήματα των οποίων η λύση δεν μπορεί να επαληθευτεί σε πολυωνυμικό χρόνο εάν προσεγγιστούν με ντετερμινιστικές μεθόδους. Συνεπώς, είναι σημαντικό να εξετάσουμε τι δυνατότητες έχει κάθε τύπος αλγορίθμου όσον αφορά το μέγεθος του προβλήματος και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτεί για να φτάσει στην επίλυσή του. Πιο συγκεκριμένα:

- Οι ακριβείς αλγόριθμοι (exact algorithms) εντοπίζουν την ακριβή λύση αλλά σε περιορισμένου μεγέθους προβλήματα.
- Σε πολύπλοκα προβλήματα οι Ευρετικοί (Heuristic) Αλγόριθμοι εφαρμόζοντας ευρετικούς κανόνες αναζητούν την λύση ακόμα και σε περιοχές του χώρου λύσεων όπου δεν φαίνεται να υπάρχουν πιθανές λύσεις, υστερώντας σε ποιότητα.
- Οι μετα-ευρετικοί (metaheuristic) αλγόριθμοι, μεταβάλλουν τις εντοπιζόμενες λύσεις που προκύπτουν από την αλγοριθμική αναζήτηση με βάση μία πληροφορία ή ένα σύνολο κανόνων. Η εξέλιξη αυτής της μεθόδου οδήγησε στην ανάπτυξη νοημοσύνης που χρησιμοποιείται για την αναζήτηση ποιοτικότερων λύσεων (Kyriklidis, 2015). Όταν αυτοί

οι κανόνες εμπνέονται από φαινόμενα και συμπεριφορές που απαντώνται στη Φύση, ο αντίστοιχος αλγόριθμος που μοντελοποιεί την πληροφορία μπορεί να ενταχθεί στους Νοήμονες Αλγόριθμους Εμπνευσμένους από την Φύση.

Η δυσκολία των περισσότερων προβλημάτων διαχείρισης πόρων και χρονικού προγραμματισμού ανήκοντας στην κλάση NP καθιστά τις ευρετικές μεθόδους χρονοβόρες και αναποτελεσματικές. Γι' αυτό επιστρατεύονται νοήμονες μέθοδοι (intelligent methods) για την εύρεση υπο-βέλτιστων (near optimal) λύσεων. Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται διάφορες μέθοδοι που καλούνται να λύσουν το πρόβλημα της βέλτιστης Κατανομής Πόρων (Resource Leveling), αρκετές εκ των οποίων παρουσιάζονται και στις εργασίες του Χρ. Κυρικλίδη (Kyriklidis and Dounias, 2016, 2014).

**Πίνακας 1:** Εργασίες με χρήση πραγματικών δεδομένων

Έτος	Εργασία	Μέγεθος έργου
1999	(AL-Tabtabai and Alex, 1999)	16
1999	(Leu and Yang, 1999)	27
2003	(Kim, Gen and Yamazaki, 2003)	27
2005	(Yan Liu et al., 2005)	10
2007	(El-Gafy, 2007)	20
2008	(N. Pang, Y. Shi and Y. You, 2008)	6
2008	(Priyanto, Adiwijaya and Maharani, 2008)	8
2008	(Fathi and Afshar, 2008)	10
2009	(W. Tian and Y. Tian, 2009)	13
2010	(Bozorg Haddad et al., 2010)	8
2012	(Guo et al., 2012)	14
2012	(Garmsiri and Abassi, 2012)	12
2012	(Iranagh and Sonmez, 2012)	10
2013	(Ghoddousi et al., 2013)	6
2015	(D. Pythaloka, A. T. Wibowo and M. D. Sulistiyo, 2015)	6
2015	(Kaiafa and Chassiakos, 2015)	10
2015	(Benjaoran, Tabyang and Sooksil, 2015)	8
2015	(Dunham, 2015)	59
2016	(Gaitanidis et al., 2016)	1178
2017	(Ponz-Tienda et al., 2017)	71
2017	(Wenmin Han and Binbin Zhu, 2017)	10
2018	(Prayogo et al., 2018)	44
2019	(Prayogo and Kusuma, 2019)	44

Αντίστοιχες μέθοδοι στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων σε τεχνητά και πραγματικά προβλήματα. Συνήθως, τεχνητά έργα επιλέγονται από τη βάση δεδομένων PSPLib<sup>1</sup> (Project Scheduling Problem Library), τα οποία έχουν 20, 30, 40, 60, 90 ή 120 δραστηριότητες (Zhang et al., 2005; Anagnostopoulos and

<sup>1</sup> <http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/>

Koulinas, 2010; Li, Wuliang and Zhongliang, 2010; Ponz-Tienda et al., 2013; Kim, 2013; Koulinas, Kotsikas and Anagnostopoulos, 2014; Huang, Huang and Pei, 2015; Prayogo et al., 2018). Ωστόσο, στα τεχνητά έργα αυτά οι εργασίες εκτελούνται σειριακά, δηλαδή πρέπει να ολοκληρωθούν οι προαπαιτούμενες δραστηριότητες για να ξεκινήσει η επόμενη.

Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι εργασίες που έχουν χρησιμοποιήσει δεδομένα από πραγματικά έργα. Όπως είναι προφανές, όλα τα έργα είναι μικρά (από 6 έως 27 δραστηριότητες) εκτός από τις εργασίες των (Prayogo et al., 2018; Prayogo and Kusuma, 2019) που έχουν ένα έργο των 44 δραστηριοτήτων, την εργασία του (Dunham, 2015) που περιέχει δεδομένα για έργο 59 δραστηριοτήτων και την εργασία των (Ponz-Tienda et al., 2017) που επιλύει έργο 71 δραστηριοτήτων.

Στη βιβλιογραφία περιλαμβάνεται και μια εργασία που προήλθε από το εργαστήριο ΔΕΛΑΠ του Πανεπιστημίου Αιγαίου (Gaitanidis et al., 2016) στην οποία έγινε επίλυση ενός έργου με εμφανώς μεγαλύτερης τάξης μεγέθους εργασίες σε σχέση με τις προηγούμενες δημοσιευμένες έρευνες. Πιο συγκεκριμένα επιλύθηκε το πρόβλημα της νηολόγησης πλοίου, με συνολικό αριθμό 1178 δραστηριοτήτων.

## **2.4 Κίνητρα Έρευνας**

Το ενεργειακό αποτύπωμα των σύγχρονων κρατών αλλάζει ραγδαία βασίζοντας την παραγωγή ηλεκτρισμού σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Οι παλαιάς τεχνολογίας και χαμηλής απόδοσης ρυπογόνες εγκαταστάσεις παραγωγής ρεύματος με την καύση λιγνίτη δίνουν την θέση τους σε Αιολικά και Φωτοβολταϊκά Πάρκα. Οι λιγνιτικές μονάδες έχουν τεράστιο μέγεθος και συγκεντρώνονται σε λίγες περιοχές ενώ οι αιολικές και φωτοβολταϊκές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής διασπείρονται σε όλη την επικράτεια. Η τοπική παραγωγή ρεύματος από τους νέους παραγωγούς συνδέεται στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για να τροφοδοτήσει τους καταναλωτές, μέσω νέων Υποσταθμών που κατασκευάζονται κοντά στο σημείο παραγωγής.

Ταυτόχρονα επιχειρείται η ηλεκτρική διασύνδεση των νησιών με την ενδοχώρα ώστε η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών στα νησιά να καλύπτεται από την παραγωγή στην ηπειρωτική χώρα αντικαθιστώντας έτσι την μέχρι τώρα πολυδάπανη και ρυπογόνα τοπική ηλεκτροπαραγωγή των νησιών από εγκαταστάσεις καύσης πετρελαίου. Η διασύνδεση υλοποιείται με την χρήση υποβρυχίου ηλεκτρικού καλωδίου με τα άκρα του να τερματίζουν σε επίγειους Τερματικούς Σταθμούς.

Η κατασκευή Υποσταθμών και Τερματικών Υποσταθμών σημειώνει ήδη ραγδαία ανάπτυξη καθώς ο νέος ενεργειακός σχεδιασμός προβλέπει τον πολλαπλασιασμό των νέων σημείων παραγωγής και την σύνδεση της πλειοψηφίας των νησιών στο ηπειρωτικό δίκτυο

μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για τεχνικά έργα που βασίζονται σε όμοια είδη πόρων ενώ ενσωματώνουν παρόμοιες λογικές σχεδιασμού.

Λόγω της αναμενόμενης αλματώδους αύξησης της κατασκευής νέων Υποσταθμών και Τερματικών Σταθμών, κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν τρόποι μείωσης του κόστους κατασκευής μέσω της εξομάλυνσης πόρων.

Για την προσέγγιση του προβλήματος επιλέχθηκε μια νοήμων μέθοδος, η οποία προέρχεται από ένα σύνολο μεθόδων που καλούνται Εμπνευσμένες από τη Φύση (Nature Inspired) και δοκιμάστηκε με επιτυχία σε μικρά τεχνητά έργα (Tzanetos et al., 2018) από την βιβλιοθήκη PSPLib. Η μέθοδος καλείται Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό (Sonar Inspired Optimization) και πέρα από την αυτούσια εφαρμογή της, δοκιμάστηκε και ένα υβριδικό σχήμα που περιέχει μηχανισμό ελέγχου λύσεων μίας άλλης μεθόδου εμπνευσμένης από την φύση, της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing).

### 3 Πραγματικά Προβλήματα Κατανομής Πόρων σε Έργα Ενέργειας

Ο προγραμματισμός πόρων σε ενεργειακά έργα αποτελεί ανέκαθεν μία πολύπλοκη διαδικασία που αφενός εξαρτάται από εξωγενείς παράγοντες (εργασίες σε εξωτερικό χώρο και αδειοδοτικές δυσκολίες-προσφυγές κατά τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των έργων) και αφετέρου απαιτεί την ταυτόχρονη διαθεσιμότητα πολλών ειδών πόρων σε διαφορετικά στάδια της κατασκευής.

Η στροφή στην απολιγνιτοποίηση και την προώθηση της πράσινης ενέργειας (green energy) οδήγησε στην αποκέντρωση των πηγών παραγωγής (εγκατάλειψη των μεγάλων λιγνιτικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης των 0,5-1GW) και την υιοθέτηση της διασπαρμένης παραγωγής (πολλά αιολικά πάρκα της τάξης των 0,05GW).

Στο μείγμα της παραγωγής υπάρχουν Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) εγκατεστημένης δυναμικότητας 5 GW εκ των οποίων τα 2,5GW αφορούν αιολική ενέργεια, όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα. Προβλέπεται ο διπλασιασμός της εγκατεστημένης ισχύος σε βάθος δεκαετίας με την προσθήκη ακόμα 2 GW τουλάχιστον από Αιολικά Πάρκα κατά τον ακόλουθο Πίνακα 2.

**Πίνακας 2:** Εγκατεστημένη Ισχύς Σταθμών Παραγωγής

ΕΙΔΟΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)		Σε λειτουργία
	Μη δεσμευτική Προσφορά Σύνδεσης	Δεσμευτική Προσφορά Σύνδεσης	
Αιολικά	16527	1892	2302
Φωτοβολταϊκά	1280	301	2445

Την τελευταία δεκαετία, λόγω της οικονομικής επιβράδυνσης αλλά και του τοπικού κορεσμού του Δικτύου Μεταφοράς το οποίο δεν μπορεί να δεχθεί νέες εισροές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), υπάρχουν Άδειες Παραγωγής (ειδικά για Αιολικά Πάρκα), της τάξης του 1GW οι οποίες παραμένουν αδρανείς, χωρίς να πραγματοποιούνται εργασίες κατασκευής των πάρκων και των έργων σύνδεσης τους στο Σύστημα (ΑΔΜΗΕ ΑΕ, 2018).

Οι παραγωγοί τηρώντας στάση αναμονής, προσδοκούν στην βελτίωση του επενδυτικού κλίματος αλλά και την ολοκλήρωση των έργων αναβάθμισης και επέκτασης του υφισταμένου Δικτύου Μεταφοράς ώστε να εκκινήσουν οι διαδικασίες κατασκευής. Ως αποτέλεσμα, το αρχικό χρονοδιάγραμμα των έργων είναι σχεδιασμένο συνήθως με τα δεδομένα τεχνολογίας και διαθεσιμότητας πόρων περασμένων ετών και συχνά υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης, τόσο όσον αφορά τον χρονοπρογραμματισμό των εργασιών αλλά και ως προς την κατανομή των απαιτούμενων πόρων.

### **3.1 Κατασκευή Υποσταθμών Ενέργειας**

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα από την πηγή καυσίμου που χρησιμοποιείται, διακινείται προς την κατανάλωση μέσω του Δικτύου Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δίκτυο Μεταφοράς Υψηλής Τάσης 150kV ή Υπερυψηλής Τάσης 400kV).

Η σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο γίνεται μέσω Υποσταθμών Ανύψωσης Τάσης (ΥΣ) ή και Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ) όπου γίνεται ο μετασχηματισμός της παραγόμενης ενέργειας σε υψηλής τάσης κατάλληλη για μεταφορά. Σύμφωνα με το Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς, υπάρχουν περίπου 200 Υποσταθμοί και 25 Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΑΔΜΗΕ ΑΕ, 2018).

Τα αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε τοποθεσίες με υψηλό αιολικό δυναμικό (κορυφογραμμές και νησιά στον Ελλαδικό χώρο). Κάθε τέτοια αιολική μονάδα παραγωγής χρησιμοποιεί ανεμογεννήτριες που παράγουν ισχύ σε επίπεδο τάσης 30kV (Μέση Τάση) και συνδέεται στο δίκτυο μεταφοράς ενέργειας (150kV ή 400kV) μέσω υποσταθμών μετατροπής της Μέσης Τάσης σε Υψηλή ή Υπερυψηλή Τάση (ΑΔΜΗΕ ΑΕ, 2019).

Οι Υποσταθμοί βρίσκονται σε αποστάσεις έως 5km από το αιολικό πάρκο δηλαδή συνήθως σε αγροτικές ή ορεινές εκτάσεις ενώ, ανάλογα με την ισχύ που διακινούν και την τεχνολογία κατασκευής τους, αναπτύσσονται σε εκτάσεις 5-10 στρεμμάτων (ΑΔΜΗΕ ΑΕ, 2018).

Ως αποτέλεσμα υπάρχει γεωμετρικά αυξανόμενη ανάγκη κατασκευής νέων υποσταθμών σε απομακρυσμένες τοποθεσίες που απαιτεί την βέλτιστη κατανομή των πόρων και την όσο δυνατόν συνεχή χρήση τους ώστε να αποφεύγεται η συχνή μετακίνηση τους από/προς το εργοτάξιο.

#### **3.1.1 Παρουσίαση Δεδομένων**

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τα δεδομένα από το χρονοδιάγραμμα που αφορά την κατασκευή ενός τυπικού υποσταθμού για την διασύνδεση στο Σύστημα ο οποίος λόγω των προαναφερόμενων αναπτύσσεται σε έκταση 5 στρεμμάτων και περιλαμβάνει όλες τις κατασκευαστικές και ηλεκτρομηχανολογικές εργασίες που απαιτούνται ώστε ο Υποσταθμός να μπορεί να συνδεθεί στο Σύστημα (ΑΔΜΗΕ, 2018).

Συνολικά οι εργασίες του συγκεκριμένου έργου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 3:** Αναλυτική λίστα δραστηριοτήτων έργου Κατασκευής Υποσταθμών Ενέργειας

A/A	Δραστηριότητα
1	Υπογραφή Σύμβασης – ΕΝΑΡΞΗ
2	Εργασίες διαμόρφωσης
3	Χωροθέτηση – Σήμανση
4	Εγκατάσταση εργοταξίων
5	Γενικές εκσκαφές
6	Εκσκαφές θεμελίωσης
7	Εργασίες οπλισμένου σκυροδέματος
8	Αρχιτεκτονικά τελειώματα
9	Εκσκαφές περίφραξης
10	Εργασίες οπλισμένου σκυροδέματος περίφραξης
11	Εγκατάσταση μεταλλικών πλεγμάτων
12	Προκατασκευή βάσεων εξοπλισμού
13	Εκσκαφές βάσεων
14	Οπλισμένο σκυρόδεμα βάσεων μετασχηματιστή
15	Οπλισμένο σκυρόδεμα λοιπών βάσεων εξοπλισμού
16	Εργασίες μόνωσης
17	Κανάλια καλωδίων
18	Τοποθέτηση γείωσης- επιχώσεις
19	Τελειώματα περιβάλλοντα χώρου
20	Δοκιμές παραλαβής εξοπλισμού
21	Παράδοση στο έργο εσωτερικού εξοπλισμού
22	Παράδοση στο έργο μετασχηματιστή & υπαίθριου εξοπλισμού
23	Παράδοση στο έργο πινάκων μέσης τάσης
24	Παράδοση στο έργο πινάκων χαμηλής τάσης
25	Παράδοση στο έργο βοηθητικού υπαίθριου εξοπλισμού
26	Παράδοση στο έργο μεταλλικών κριωμάτων υπαίθριου εξοπλισμού
27	Παράδοση στο έργο πινάκων αυτοματισμού
28	Ηλεκτρομηχανολογικές εργασίες κτιρίου υποσταθμού
29	Ανέγερση εσωτερικού εξοπλισμού
30	Τοποθέτηση πινάκων μέσης τάσης
31	Εγκατάσταση πινάκων χαμηλής τάσης
32	Εγκατάσταση πινάκων αυτοματισμού-συστήματος τηλεμετρίας
33	Εγκατάσταση μετασχηματιστή
34	Τοποθέτηση μεταλλικών κριωμάτων
35	Ανέγερση υπαίθριου εξοπλισμού
36	Εξωτερικός φωτισμός
37	Καλώδια ισχύος και ελέγχου
38	Συνδέσεις καλωδίων ισχύος και ελέγχου υπαίθριου εξοπλισμού
39	Έλεγχοι και δοκιμές
40	ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ - ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΠΑΡΑΔΟΣΗ

Οι εργασίες εκτελούνται από τα πέντε (5) συνεργεία ως ακολούθως:

1. Συνεργείο Εκσκαφών-Χωματοουργικές Εργασίες
2. Συνεργείο Ηλεκτρομηχανολογικών Εργασιών
3. Συνεργείο Οπλισμένου Σκυροδέματος
4. Συνεργείο Κατασκευών
5. Συνεργείο Μεταφορών

Κάθε συνεργείο αποτελείται από τρεις (3) κατηγορίες :

- α) Μηχανήματα Έργου ή Εξειδικευμένα Μηχανήματα
- β) Χειριστές Μηχανημάτων Έργου ή/και Εξειδικευμένων Μηχανημάτων
- γ) Βοηθητικό Προσωπικό

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, γίνεται η ακόλουθη ομαδοποίηση: Κάθε μηχανήμα, χειριστής και άτομο βοηθητικού προσωπικού λογίζεται ως μία (1) μονάδα πόρου. Κάθε συνεργείο αποτελείται από Μηχανήματα Έργου ή/και Εξειδικευμένα Μηχανήματα με τους αντίστοιχους χειριστές και από το βοηθητικό προσωπικό. Αναλυτικότερα ισχύουν τα εξής ανά συνεργείο :

**Συνεργείο Εκσκαφών:** Αποτελείται από έξι (6) μηχανήματα έργου με έναν χειριστή ανά μηχανήμα. Επίσης υπάρχουν και 2 άτομα βοηθητικό προσωπικό. Σε πλήρη χρήση ο πόρος περιλαμβάνει 6 μηχανήματα έργου, 6 χειριστές και 2 άτομα προσωπικό.

**Συνεργείο Ηλεκτρομηχανολογικών Εργασιών:** Αποτελείται από πέντε (5) εξειδικευμένα μηχανήματα με έναν χειριστή ανά μηχανήμα. Επίσης υπάρχουν και 5 άτομα βοηθητικό προσωπικό. Σε πλήρη χρήση ο πόρος περιλαμβάνει 5 μηχανήματα έργου, 5 χειριστές και 5 άτομα προσωπικό.

**Συνεργείο Οπλισμένου Σκυροδέματος:** Αποτελείται από έξι (6) εξειδικευμένα μηχανήματα με δύο χειριστές ανά μηχανήμα και 2 άτομα βοηθητικό προσωπικό. Σε πλήρη χρήση ο πόρος περιλαμβάνει 6 μηχανήματα έργου, 12 χειριστές και 2 άτομα προσωπικό.

**Συνεργείο Κατασκευών:** Αποτελείται από έξι (6) εξειδικευμένα μηχανήματα με έναν χειριστή ανά μηχανήμα. Επίσης υπάρχουν και 6 άτομα βοηθητικό προσωπικό. Σε πλήρη χρήση ο πόρος περιλαμβάνει 6 μηχανήματα έργου, 6 χειριστές και 6 άτομα προσωπικό.

**Συνεργείο Μεταφορών:** Αποτελείται από τέσσερα (4) μηχανήματα έργου με έναν χειριστή ανά μηχανήμα. Επίσης υπάρχουν και 2 άτομα βοηθητικό προσωπικό. Σε πλήρη χρήση ο πόρος περιλαμβάνει 4 μηχανήματα έργου, 4 χειριστές και 2 άτομα προσωπικό.



### 3.1.2 Επεξεργασία δεδομένων

Το έργο αναλύεται σε σαράντα (40) συνολικά διακριτές δραστηριότητες με την πρώτη και τελευταία αυτών να αποτελούν ψευδείς δραστηριότητες (με μηδενική διάρκεια και χωρίς δέσμευση πόρων). Κάθε δραστηριότητα αντιστοιχίζεται στην διάρκεια της ενώ απεικονίζεται και η εξάρτηση της από προηγούμενες δραστηριότητες κατά τον Πίνακα ΥΣ. Οι σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των δραστηριοτήτων είναι της μορφής: Τέλος Προηγούμενης Δραστηριότητας - Αρχή Επόμενης (Finish to Start-FS). Σε δέκα (10) από τις δραστηριότητες εμφανίζεται και προπορεία ή καθυστέρηση έναρξης της επόμενης δραστηριότητας σε σχέση με το τέλος της προηγούμενης και συμβολίζεται με – ή + αντίστοιχα.

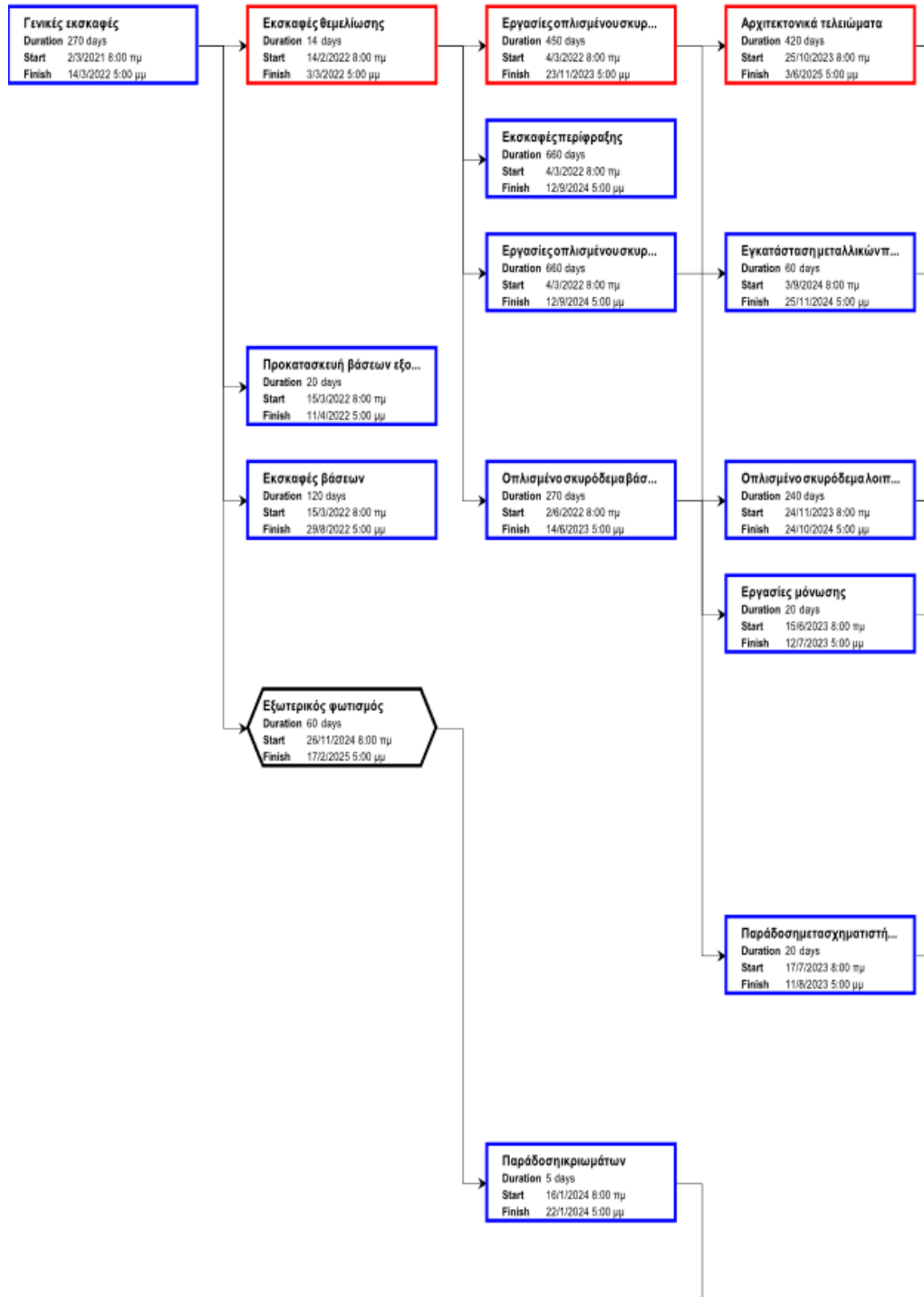
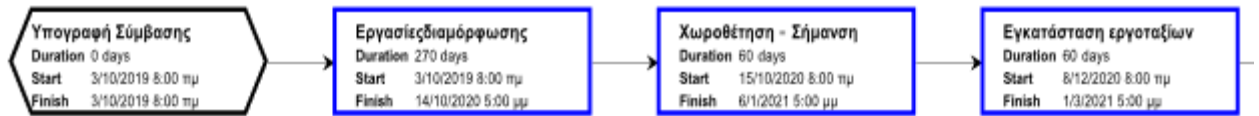
Ενδεικτικά, η δραστηριότητα “Εκσκαφές Θεμελίωσης” αντιστοιχίζεται στην στήλη “A/A” με τον αριθμό “6” αποτελώντας την έκτη από τις 40 δραστηριότητες. Η εργασία 6, συνδέεται με σχέση εξάρτησης FS-30 με την δραστηριότητα 5 (Γενικές Εκσκαφές). Αυτό σημαίνει ότι κατά την κατάρτιση του χρονοδιαγράμματος δραστηριοτήτων, οι Εκσκαφές Θεμελίωσης μπορούν να εκκινήσουν 30 ημέρες πριν τελειώσουν οι Γενικές Εκσκαφές.

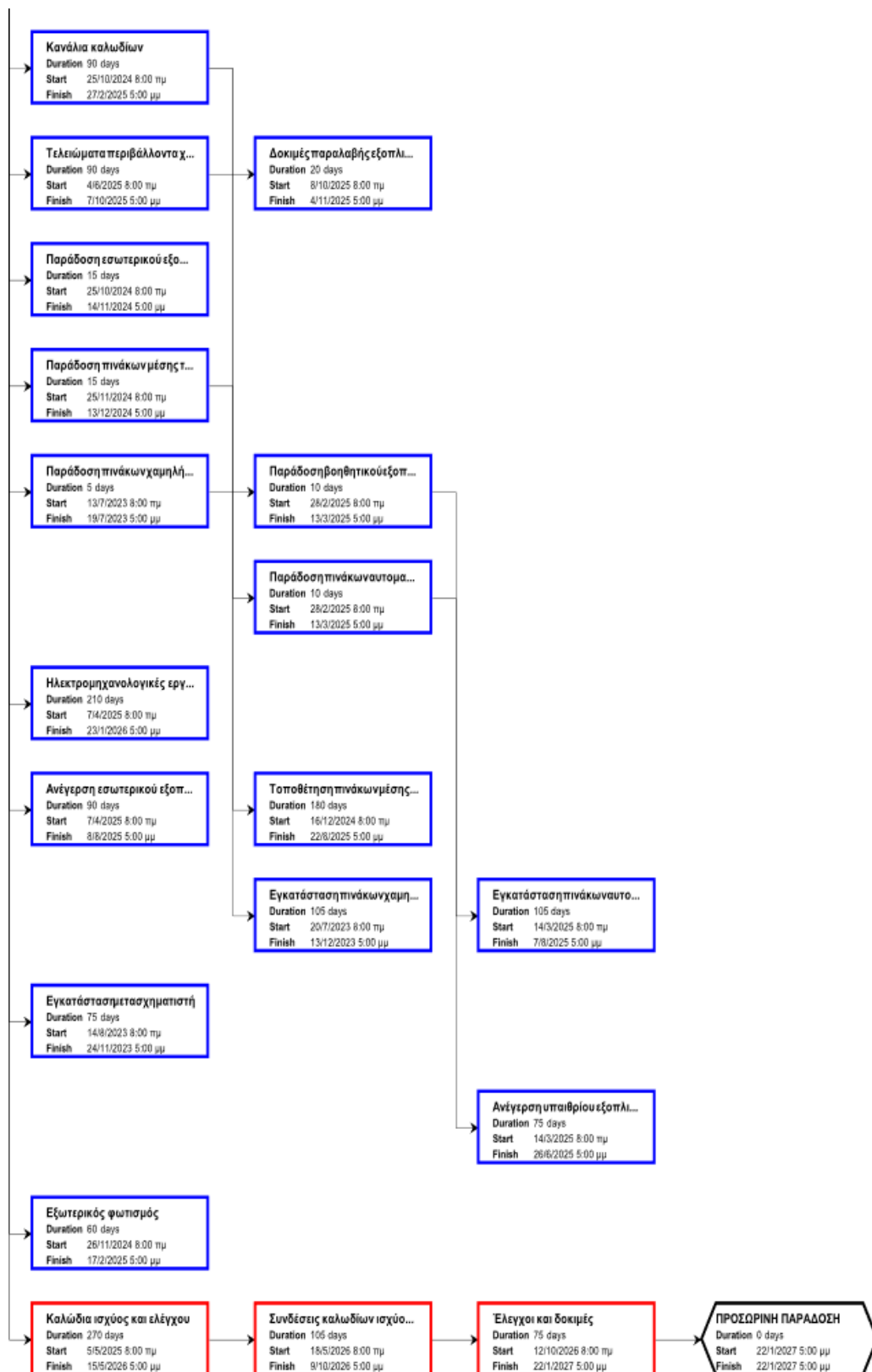
Αντίστοιχα, η δραστηριότητα “Οπλισμένο σκυρόδεμα βάσεων μετασχηματιστή” αντιστοιχίζεται στην στήλη “A/A” με τον αριθμό “14” αποτελώντας την δέκατη τέταρτη (14<sup>η</sup>) από τις 40 δραστηριότητες. Η εργασία 14, συνδέεται με σχέση εξάρτησης FS+90 με την δραστηριότητα 6 (Εκσκαφές Θεμελίωσης). Αυτό σημαίνει ότι κατά την κατάρτιση του χρονοδιαγράμματος δραστηριοτήτων, η εργασία “Οπλισμένο σκυρόδεμα βάσεων μετασχηματιστή” μπορεί να εκκινήσει 90 ημέρες μετά την ολοκλήρωση της δραστηριότητας “Εκσκαφές Θεμελίωσης”.

Οι δραστηριότητες παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 ως διάγραμμα μορφής ανάλυσης εργασιών WBS (Work Breakdown Structure). Διακρίνονται με κόκκινο χρώμα περιγράμματος οι δέκα (10) κρίσιμες δραστηριότητες που αποτελούν και τις δραστηριότητες της κρίσιμης διαδρομής.

**Πίνακας 4:** Δραστηριότητες Κατασκευής Υ/Σ (Διάρκειες Εργασιών και Εξαρτήσεις)

A/A	Διάρκεια δραστηριότητας	Εξάρτηση – Διαφορά Φάσης
1	0 ημέρες	-
2	270 ημέρες	1
3	60 ημέρες	2
4	60 ημέρες	3FS-30 ημέρες
5	270 ημέρες	4
6	14 ημέρες	5FS-30 ημέρες
7	450 ημέρες	6
8	420 ημέρες	7FS-30 ημέρες
9	660 ημέρες	6
10	660 ημέρες	6
11	60 ημέρες	10FS-10 ημέρες
12	20 ημέρες	5
13	120 ημέρες	5
14	270 ημέρες	6FS+90 ημέρες
15	240 ημέρες	7
16	20 ημέρες	14
17	90 ημέρες	15
18	480 ημέρες	5
19	90 ημέρες	8
20	20 ημέρες	19
21	15 ημέρες	15
22	20 ημέρες	14FS+30
23	15 ημέρες	15FS+30
24	5 ημέρες	16
25	10 ημέρες	17
26	5 ημέρες	18
27	10 ημέρες	17
28	210 ημέρες	8FS-60 ημέρες
29	90 ημέρες	8FS-60 ημέρες
30	180 ημέρες	23
31	105 ημέρες	24
32	105 ημέρες	27
33	75 ημέρες	22
34	75 ημέρες	26
35	75 ημέρες	25
36	60 ημέρες	11
37	270 ημέρες	8FS-30 ημέρες
38	105 ημέρες	37
39	75 ημέρες	38
40	0 ημέρες	39





Εικόνα 1α,β,γ: Διάγραμμα δομής ανάλυσης εργασιών (WBS) Υ/Σ

### 3.2 Έργα Διασύνδεσης Νήσων με την Ηπειρωτική Ελλάδα

Η απολιγνιτοποίηση και η στροφή στις πράσινες μορφές ενέργειας επηρέασε περαιτέρω και τον ενεργειακό σχεδιασμό της Ελλάδας καθώς το σύνολο των νησιών (ιδιαίτερα των Μη Διασυνδεδεμένων στο Σύστημα Μεταφοράς της ηπειρωτικής Ελλάδας) παράγει τοπικά την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται με εργοστάσια καύσης diesel ή λιγνίτη.

Ήδη από το τρέχον έτος (2020) περιορίζεται στο ελάχιστο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικά καύσιμα στα νησιά και υλοποιούνται οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις των νησιών με την ηπειρωτική χώρα. Σε αυτό το πλαίσιο, εκκινεί η υποβρύχια διασύνδεση του ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς της Κρήτης με το αντίστοιχο της Πελοποννήσου (150kV).

Στον ακόλουθο Πίνακα 5 φαίνεται η συμμετοχή των συμβατικών καυσίμων στην παραγωγή ενέργειας η οποία θα περιοριστεί τουλάχιστον κατά το ένα τρίτο μέσα στην επόμενη δεκαετία με κατάργηση κυρίως Ατμοηλεκτρικών Σταθμών (ΑΗΣ) (ΑΔΜΗΕ ΑΕ, 2018).

**Πίνακας 5:** Συμβατικοί Σταθμοί Παραγωγής

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΜΟΝΑΔΑ	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Καθαρή Ισχύς (MW)
ΑΗΣ Αγ.Δημητρίου	Άγ. Δημήτριος I	300	274
ΑΗΣ Αγ.Δημητρίου	Άγ. Δημήτριος II	300	274
ΑΗΣ Αγ.Δημητρίου	Άγ. Δημήτριος III	310	283
ΑΗΣ Αγ.Δημητρίου	Άγ. Δημήτριος IV	310	283
ΑΗΣ Αγ.Δημητρίου	Άγ. Δημήτριος V	375	342
ΑΗΣ Αμυνταίου	Αμύνταιο I	300	273
ΑΗΣ Αμυνταίου	Αμύνταιο II	300	273
ΑΗΣ Καρδιάς	Καρδιά I	300	275
ΑΗΣ Καρδιάς	Καρδιά II	300	275
ΑΗΣ Καρδιάς	Καρδιά III	306	280
ΑΗΣ Καρδιάς	Καρδιά IV	306	280
ΑΗΣ Μεγαλόπολης Α	Μεγαλόπολη III	300	255
ΑΗΣ Μεγαλόπολης Β	Μεγαλόπολη IV	300	256
ΑΗΣ Μελίτης	Μελίτη I	330	289
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ		4337	3912

Για να περατωθεί επιτυχώς και έγκαιρα η διασύνδεση των δικτύων, η κατασκευή του υποβρύχιου τμήματος (υποβρύχιο καλώδιο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας) πρέπει να

συνδυαστεί με την κατασκευή των τερματικών επίγειων υποσταθμών σε Πελοπόννησο και Κρήτη και την ταυτόχρονη αναβάθμιση των υφισταμένων επίγειων δικτύων αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του προγραμματισμού και της κατανομής πόρων. Παράλληλα σε εξέλιξη βρίσκονται και τα έργα ηλεκτρικής διασύνδεσης των Κυκλάδων με το ηπειρωτικό δίκτυο (Διασύνδεση Κυκλάδων Φάση Β και Γ) (ΑΔΜΗΕ ΑΕ, 2018).

Κοινό σημείο των ηλεκτρικών διασυνδέσεων των νήσων αλλά και της ένταξης νέων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Σύστημα αποτελεί η κατασκευή Υποσταθμών. Η κατασκευή των Υποσταθμών πρέπει να έχει ολοκληρωθεί νωρίτερα από την υποβρύχια διασύνδεση ή την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, ώστε το υποβρύχιο καλωδιακό σύστημα να τερματίσει σε έτοιμες εγκαταστάσεις μετατροπής της τάσης. Αυτό καθιστά ακόμα κρισιμότερη την τήρηση του χρονοδιαγράμματος και την βέλτιστη δυνατή επιτάχυνση των εργασιών που απαιτούνται για την κατασκευή των υποσταθμών και η βελτιστοποίηση σε όρους χρονοπρογραμματισμού της κατασκευής υποσταθμών μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στα συνολικά έργα που απαιτούνται για την διασύνδεσης στο σύστημα.

Στην περίπτωση των υποβρύχιων διασυνδέσεων Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών (ΜΔΝ) με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ), ένα απομονωμένο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως αυτό των ΜΔΝ, συνδέεται με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό δίκτυο μέσω υποβρύχιων καλωδίων.

Τα υπάρχοντα δίκτυα στα ΜΔΝ έχουν σχεδιαστεί, τόσο όσον αφορά τον τεχνικό εξοπλισμό όσο και την πλευρά της λειτουργίας, με γνώμονα να εξυπηρετούν το τοπικό φορτίο των καταναλωτών που βρίσκονται επί του ΜΔΝ. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται συνήθως από την καύση πετρελαίου σε συμβατικές απαρχαιωμένες μονάδες παραγωγής με την παραγόμενη ενέργεια να διανέμεται μέσω δικτύων διανομής στους καταναλωτές.

Το μέγεθος των παραγωγών ενέργειας καθορίζεται στην φάση της κατασκευής τους, με βάση την ζήτηση των τοπικών καταναλωτών. Εφόσον υπάρχει μόνιμη ανάγκη αύξησης της παραγωγής, αυτή υλοποιείται με επέκταση/αναβάθμιση των παραγωγικών δυνατοτήτων των υπάρχοντων εργοστασίων καύσης ενώ για προσωρινή αντιμετώπιση αυξημένης ζήτησης επιλέγεται η προσωρινή μεταφορά κινητών μονάδων (γεννητριών) π.χ. κατά την θερινή τουριστική περίοδο ή κατά την συντήρηση/βλάβη των υπάρχοντων μονάδων.

Ως αποτέλεσμα αυτής της πρακτικής, τα δίκτυα μεταφοράς/διανομής επί των ΜΔΝ, μπορούν να υποστηρίξουν την διανομή στον καταναλωτή ενέργειας οριακά ίσης με την υπάρχουσα ζήτηση. Νέοι παραγωγοί ενέργειας, όπως Αιολικοί ή Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί Παραγωγής δεν μπορούν να συνδεθούν στο Σύστημα καθώς η ζήτηση καλύπτεται από τους υπάρχοντες σταθμούς παραγωγής με συμβατικά καύσιμα.

Αντίθετα, τα ηπειρωτικά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να διακινούν ενέργεια από πολλούς παραγωγούς ανά την επικράτεια και να τροφοδοτούν το σύνολο της ενδοχώρας. Παράλληλα, αναβαθμίζονται συνεχώς διότι είναι συνδεδεμένα με τα δίκτυα των γειτονικών χωρών επιτρέποντας αμφίδρομη ροή ενέργειας (εισαγωγή κατά τις περιόδους χαμηλής παραγωγής και εξαγωγή πλεοναζουσών ποσοτήτων).

Η περιορισμένη ικανότητα παραγωγής/απορρόφησης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στα ΜΔΝ αίρεται με την ηλεκτρική διασύνδεση τους με το ηπειρωτικό δίκτυο. Οι τοπικοί ρυπογόνοι και κοστοβόροι σταθμοί παραγωγής μπορούν να αποσύρονται αφού η τοπική ζήτηση καλύπτεται από τους συνδεδεμένους στο ΕΣΜΗΕ παραγωγούς ενώ ταυτόχρονα νέοι σταθμοί ΑΠΕ εγκατεστημένοι επί των ΜΔΝ μπορούν να αναπτυχθούν και να εγχύουν ενέργεια στο ηπειρωτικό δίκτυο εκμεταλλευόμενοι το τοπικό πλούσιο αιολικό/ηλιακό δυναμικό, πολλαπλασιάζοντας τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Από τεχνικής άποψης, η ηλεκτρική διασύνδεση ΜΔΝ με το ΕΣΜΗΕ χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά την κατασκευή και πόντιση του υποβρύχιου καλωδίου. Το υποβρύχιο καλώδιο αποτελεί το μέσο σύζευξης των δικτύων των ΜΔΝ και του ΕΣΜΗΕ και αποτελεί αντικείμενο εξειδικευμένων εργοστασίων και εγκαταστατών.

Το δεύτερο μέρος της διασύνδεσης αφορά στην αναβάθμιση της υπάρχουσας δικτυακής υποδομής στο ΜΔΝ ώστε να μπορεί να συγχρονιστεί με το δίκτυο του ΕΣΜΗΕ και να υποστηρίξει την αμφίδρομη ροή ενέργειας. Συνήθως είναι ευθύνη του Διαχειριστή του δικτύου του ΜΔΝ και εκκινεί πρώτο χρονικά ενώ είναι σχετικά ανεξάρτητο από την πορεία εκτέλεσης του πρώτου μέρους.

Το τρίτο μέρος αποτελείται από την ανάπτυξη των τερματικών σταθμών δικτύου (επί του ΜΔΝ και επί του ΕΣΜΗΕ) όπου θα συνδεθεί το υποβρύχιο καλώδιο. Αποτελεί το κρισιμότερο μέρος της διασύνδεσης καθώς οι τερματικοί σταθμοί ελέγχουν και συντονίζουν την ασφαλή και αποδοτική μεταφορά ενέργειας από και προς το ΜΔΝ. Επί των σταθμών εδράζεται ο εξοπλισμός σύζευξης, επιτήρησης και παραλληλισμού των ηλεκτρικών δικτύων της ηπειρωτικής χώρας και των νησιών. Ταυτόχρονα είναι το φυσικό σημείο όπου γίνεται η καταγραφή της πορείας της ενέργειας και η ομαλή έγχυση της στο δίκτυο. Όποια αλλαγή υπάρξει στα μεγέθη της διασύνδεσης (π.χ. λόγω αύξησης/μείωσης της ζήτησης ή εισαγωγής νέων παραγωγών στα τοπικά δίκτυα) πρέπει να μπορεί να καλυφθεί από τον τερματικό σταθμό με επέκταση της υποδομής του ή με τροποποίηση της λειτουργίας του.

Ο κομβικός τεχνικός ρόλος των τερματικών υποσταθμών αποδεικνύεται στην πράξη και κατά τον σχεδιασμό των έργων διασύνδεσης καθώς όσον αφορά τον χρονοπρογραμματισμό, αποτελεί ορόσημο για την κατασκευή των άλλων δύο μερών. Η απαιτούμενη χρονική διάρκεια για την πλήρη ανάπτυξη και λειτουργία του τερματικού σταθμού είναι η βάση για τον

προγραμματισμό της φάσης της κατασκευής του καλωδίου και της αναβάθμισης των υφιστάμενων δικτύων.

Οι τερματικοί σταθμοί κατασκευάζονται σε παραθαλάσσιες περιοχές καθώς πρέπει να βρίσκονται κοντά στα άκρα του υποβρύχιου καλωδίου. Τα εδάφη σε περιοχές πλησίον της θάλασσας αποτελούνται συνήθως από φερτά υλικά, με υψηλές συγκεντρώσεις υγρασίας και αλάτων, τα οποία απαιτούν διαδικασίες εκτεταμένων βελτιώσεων, παρεμβάσεων και εκσκαφών ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα τους για να μπορέσουν να υποδεχτούν κατασκευές με αυξημένες απαιτήσεις στατικότητας.

Ένας τυπικός τερματικός σταθμός ηλεκτρικής διασύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος (High Voltage Alternative Current Submarine Terminal Link) περιλαμβάνει βαρύ υπαίθριο εξοπλισμό (όπως μετασχηματιστές αρκετών εκατοντάδων τόνων) και αρκετά κτίρια στέγασης δευτερεύοντος εξοπλισμού για τον λειτουργία και τον έλεγχο της διασύνδεσης.

Τα υποβρύχια καλώδια μπορούν να προσφέρουν ενιαία ηλεκτρική διαδρομή πολλών δεκάδων χιλιομέτρων, κάτι που συνεπάγεται απώλεια ενέργειας κατά την μεταφορά ρεύματος και διαταραχές στα επίπεδα τάσης και συχνότητας. Η αντιστάθμιση αυτών των απωλειών γίνεται με την τοποθέτηση αυτεπαγωγών (συγκρίσιμου βάρους με τους μετασχηματιστές) εντός των υποσταθμών, το οποίο μεγενθύνει την συνολική πίεση που δέχεται το έδαφος. Οι αυτεπαγωγές, όπως και οι μετασχηματιστές, περιέχουν αρκετούς τόνους μονωτικού ελαίου και για λόγους ασφαλείας πρέπει να αποτρέπεται η διαρροή προς το έδαφος ή την θάλασσα μέσω της κατασκευής ελαιολεκανών. Πρόκειται για βαριές κατασκευές από σκυρόδεμα στην βάση των αυτεπαγωγών οι οποίες δρουνε προσθετικά στο συνολικό φορτίο που δέχεται συγκεντρωμένα η περιοχή που αναπτύσσεται ο σταθμός και πολλαπλασιάζουν το απαιτούμενο μέγεθος εκσκαφών σε χαμηλής ποιότητας έδαφος.

Επιπρόσθετα, όλες οι εργασίες γίνονται πλησίον της θάλασσας με περιορισμούς στην ανάπτυξη εξοπλισμού (όπως η απαγόρευση χρήσης ανυψωτικών μηχανημάτων κατά τις ημέρες υψηλού αιολικού φορτίου) ενώ συχνές είναι οι περιπτώσεις υπερχείλισης των εκσκαφών. Η ανάγκη συνεχούς επικαιροποίησης του προγράμματος εκτέλεσης των εργασιών οφείλεται τόσο στην έλλειψη προβλεψιμότητας των συνθηκών εργασίας σε υπαίθριο-παραθαλάσσιο χώρο, όσο και στην σημαντικότητα της λειτουργίας του σταθμού.

Τα άλλα δύο μέρη της διασύνδεσης (υποβρύχιο καλώδιο και αναβάθμιση υφιστάμενων εναέριων και υπόγειων δικτύων) δεν δέχονται εκτεταμένες αλλαγές κατά το σχεδιασμό και την εκτέλεση τους. Αφενός, τα υποβρύχια καλώδια είναι αρκετά κοστοβόρα και ποντίζονται στο βυθό μετά από εκτεταμένες μελέτες για την ακριβή όδευση τους, οπότε το αρχικά υπολογισμένο μήκος και η υποβρύχια όδευση τους δεν μεταβάλλονται. Αφετέρου, τα ήδη υφιστάμενα δίκτυα δεν μπορούν να τροποποιηθούν σημαντικά καθώς είχαν αρχικά σχεδιαστεί



για να καλύψουν το τοπικό περιορισμένο φορτίο. Οπότε, η όποια αλλαγή των χαρακτηριστικών της διασύνδεσης εφαρμόζεται επί των τερματικών σταθμών καθιστώντας το χρονοδιάγραμμα των εργασιών εξαιρετικά ευμετάβλητο. Παράλληλα, η ημερομηνία πέρατος των εργασιών στον σταθμό πρέπει να είναι σταθερή καθώς αυτή αποτελεί ορόσημο για την ολοκλήρωση των άλλων δύο μερών ώστε να μην υπάρχουν συνολικές καθυστερήσεις στο έργο.

Συμπερασματικά, η κατασκευή των τερματικών σταθμών είναι το μεγαλύτερης σημασίας υποέργο για μία διασύνδεση και είναι αυτή που καθορίζει την συνολική πορεία της διασύνδεσης σε όρους κόστους και χρόνου. Για αυτό, οι σχεδιαστές αλλά και οι εγκαταστάτες επικεντρώνονται σε αυτήν για να εξασφαλίσουν έγκαιρη ηλεκτρίση των ΜΔΝ.

### **3.2.1 Παρουσίαση Δεδομένων Έργου Διασύνδεσης ΜΔΝ με τον ΕΣΜΗΕ**

Ως αποτέλεσμα, στο πραγματικό έργο της Διασύνδεσης της Κρήτης με τον ΕΣΜΗΕ, η έγκαιρη ολοκλήρωση της κατασκευής του τερματικού σταθμού της Κρήτης αποτελεί την μεγαλύτερη πρόκληση. Η διασύνδεση του ηλεκτρικού δικτύου της Κρήτης με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Πελοποννήσου υλοποιείται μέσω υποβρύχιων καλωδίων μήκους 130km, της αναβάθμισης των υφιστάμενων υπόγειων και εναέριων δικτύων και την κατασκευή των τερματικών σταθμών.

Η κατασκευή των τερματικών σταθμών περιλαμβάνει σε μεγάλο ποσοστό εργασίες εκσκαφής-βελτίωσης του εδάφους και Έργα Πολιτικού Μηχανικού. Αφού προετοιμαστεί κατάλληλα το έδαφος ώστε να μπορεί να υποστηρίξει το βάρος του φέροντος εξοπλισμού και της κτιριακής υποδομής, αρχίζει η τοποθέτηση του κυρίως εξοπλισμού και η κατασκευή των κτιρίων. Ακολουθεί η εγκατάσταση του δευτερεύοντος εξοπλισμού και οι λοιπές εργασίες σύνδεσης των επιμέρους τμημάτων του εξοπλισμού ώστε ο τερματικός σταθμός να μπορεί να είναι λειτουργικός και να μπορεί να συνδεθεί αμφίπλευρα με το υποβρύχιο καλώδιο και το υπάρχον δίκτυο.

Η συντριπτική πλειοψηφία των Έργων Πολιτικού Μηχανικού απαιτεί την ύπαρξη Συνεργείων Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εκσκαφών και Κατασκευών. Ακολουθώντας στην πράξη την ίδια λογική ομαδοποίησης με το Έργο Κατασκευής Υποσταθμού οι δραστηριότητες που περιλαμβάνει το έργο παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.

**Πίνακας 6:** Δραστηριότητες τερματικού σταθμού

A/A	Δραστηριότητα
1	ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΣΥΜΒΑΣΗΣ
2	Εγκατάσταση Εργοταξίου
3	Καθαιρέσεις
4	Εκσκαφές-Εξυγίανση Εδάφους
5	Επιχώματα Περιβάλλοντος Χώρου
6	Κατασκευή Βάσης GIS
7	Κατασκευή Ελαιολεκάνης Αυτεπαγωγής 1
8	Κατασκευή Ελαιολεκάνης Αυτεπαγωγής 2
9	Κατασκευή Ελαιολεκάνης Αυτεπαγωγής 3
10	Κατασκευή Ελαιολεκάνης Αυτεπαγωγής 4
11	Κατασκευή Βάσεων Ακροκιβωτίων
12	Κατασκευή Ελαιολεκάνης ΜΣ 1
13	Κατασκευή Ελαιολεκάνης ΜΣ 2
14	Κατασκευή Ελαιολεκάνης ΜΣ 3
15	Κατασκευή Ελαιολεκάνης ΜΣ 4
16	Κατασκευή Οκίσκου Πινάκων
17	Κατασκευή Βάσης Ιστού Αντικεραυνικής Προστασίας
18	Εργασίες Κτιρίου Στέγασης
19	Διαμόρφωση Περιβάλλοντος Χώρου
20	Λοιπές ΕΠΜ
21	Εγκατάσταση Πλέγματος Γείωσης
22	Εγκατάσταση Θεμελιακής γείωσης
23	Εγκατάσταση γείωσης εξοπλισμού
24	Κτιριακές Η/Μ εγκαταστάσεις
25	Καλωδίωση
26	Εγκατάσταση Η/Μ εξοπλισμού GIS
27	Εγκατάσταση Αυτεπαγωγών
28	Εγκατάσταση Εξοπλισμού Ισχύος
29	Εγκατάσταση Ικριώματος Ακροκιβωτίων και Αλεξικέραυνων
30	Εγκατάσταση Αλεξικέραυνων
31	Εγκατάσταση Βοηθητικού Εξοπλισμού
32	Εγκατάσταση Συστημάτων Προστασίας και Ελέγχου
33	Εγκατάσταση Πυρόσβεσης
34	Λοιπές Εργασίες Η/Μ
35	Εγκατάσταση AC & DC panels
36	Έλεγχος Καλωδίωσης
37	Έλεγχος Αυτεπαγωγών
38	Ετοιμότητα Υποβρύχιου Καλωδίου
39	Έλεγχος Συστημάτων Προστασίας
40	Έλεγχος SCADA
41	Έλεγχος GIS
42	Έλεγχος εγκαταστάσεων κτιρίου
43	ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

### 3.2.2 Επεξεργασία Δεδομένων Έργου Κατασκευής Τερματικού Σταθμού

Το έργο αναλύεται σε σαράντα τρεις (43) συνολικά διακριτές δραστηριότητες με την πρώτη και τελευταία αυτών να αποτελούν ψευδείς δραστηριότητες (με μηδενική διάρκεια και χωρίς δέσμευση πόρων). Κάθε δραστηριότητα αντιστοιχίζεται στην διάρκεια της ενώ απεικονίζεται και η εξάρτηση της από προηγούμενες δραστηριότητες κατά τον Πίνακα 7.

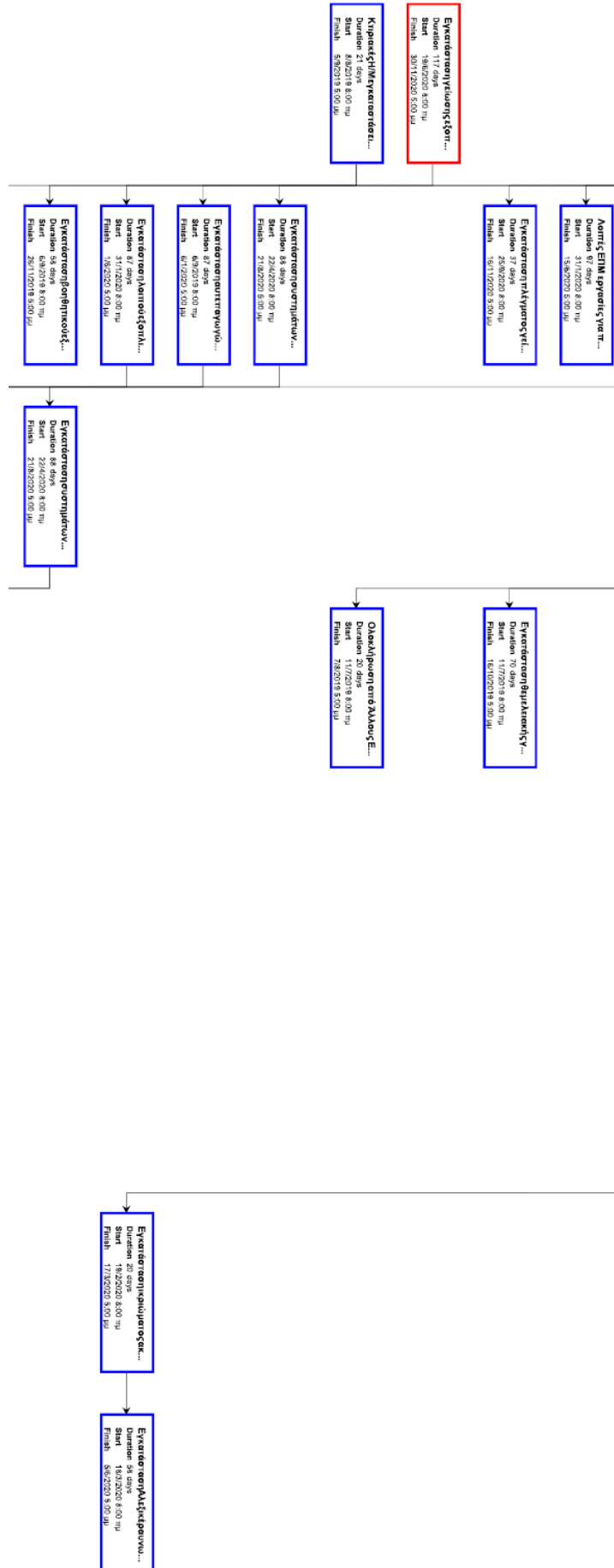
**Πίνακας 7:** Δραστηριότητες Κατασκευής ΤΣ (Διάρκειες Εργασιών και Εξαρτήσεις)

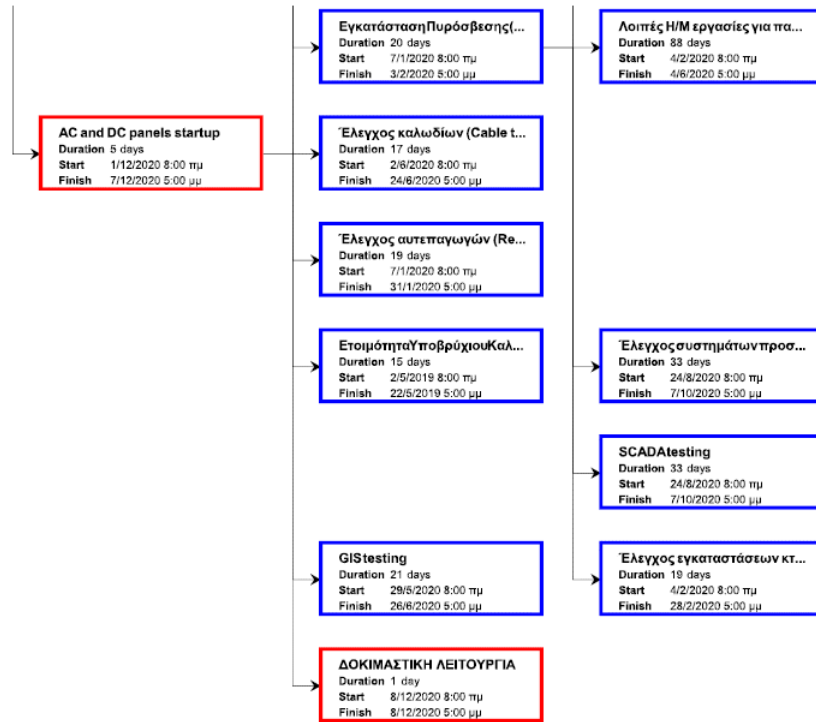
ΑΑ	Διάρκεια	Πόροι	Προσπαιτούμενες Εργασίες-Εξάρτηση
1	0 ημέρες	0	-
2	100 ημέρες	5	1
3	45 ημέρες	8	2
4	65 ημέρες	5	3
5	87 ημέρες	5	6FS+80 ημέρες
6	77 ημέρες	8	7
7	18 ημέρες	3	4FS-18 ημέρες
8	18 ημέρες	3	4FS-18 ημέρες
9	18 ημέρες	3	7FS+10 ημέρες
10	18 ημέρες	3	9
11	18 ημέρες	8	7FS+5 ημέρες
12	18 ημέρες	3	6FS-60 ημέρες
13	18 ημέρες	3	12FS+10 ημέρες
14	18 ημέρες	3	13FS-10 ημέρες
15	18 ημέρες	8	14
16	23 ημέρες	8	14
17	10 ημέρες	8	16FS-10 ημέρες
18	20 ημέρες	4	16
19	159 ημέρες	5	4
20	94 ημέρες	8	6
21	36 ημέρες	4	5
22	69 ημέρες	4	3
23	116 ημέρες	4	34FS+10 ημέρες
24	20 ημέρες	4	25
25	20 ημέρες	4	3
26	73 ημέρες	4	6
27	84 ημέρες	4	24
28	84 ημέρες	4	6
29	20 ημέρες	4	11FS+40 ημέρες
30	55 ημέρες	4	29
31	58 ημέρες	4	24
32	87 ημέρες	4	26FS-18 ημέρες
33	20 ημέρες	4	27

ΑΑ	Διάρκεια	Πόροι	Προαπαιτούμενες Εργασίες-Εξάρτηση
34	85 ημέρες	4	33
35	5 ημέρες	4	23
36	17 ημέρες	4	28
37	19 ημέρες	4	27
38	15 ημέρες	4	2
39	33 ημέρες	4	32
40	33 ημέρες	4	32
41	21 ημέρες	4	26FS-9 ημέρες
42	19 ημέρες	4	33
43	0 ημέρες	0	35

Ακολουθεί το διάγραμμα ανάλυσης ροής των εργασιών **WBS ΤΣ**.







Εικόνα 2α,β,γ: Διάγραμμα ανάλυσης ροής εργασιών WBS ΤΣ

## **4 Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Έργα**

### **4.1 Διαγράμματα Δικτύων**

Η συνοπτική γραφική απεικόνιση του συνόλου εργασιών που συνθέτουν ένα έργο μπορεί να γίνει με κατασκευή του αντίστοιχου Διαγράμματος Δικτύου Έργου. Κάθε εργασία μπορεί να αναπαρασταθεί ως κόμβος του δικτύου ενώ οι πληροφορίες για την χρονική διάρκεια, την έναρξη και την λήξη κάθε εργασίας μπορούν να εμφανίζονται μέσα σε κάθε κόμβο δημιουργώντας έτσι ένα Διάγραμμα Δραστηριότητας επί του Κόμβου (Activity on Node).

### **4.2 Διοίκηση Πόρων**

Στη βιβλιογραφία της Διοίκησης Έργου, ως πόρος μπορεί να οριστεί το οποιοδήποτε άτομο ή μηχανήμα απαραίτητο για την εκτέλεση μίας δραστηριότητας (Burke, 1999) . Στην πράξη, κάθε εργασία που εκτελείται στα πλαίσια ενός έργου, απαιτεί την χρήση εξειδικευμένου προσωπικού το οποίο συμβάλλει στην υλοποίηση της επιμέρους δραστηριότητας που αναλαμβάνει με την χρήση αντίστοιχου εξοπλισμού και μηχανημάτων.

### **4.3 Πρόβλημα Κατανομής Πόρων**

Γίνεται αντιληπτό ότι οι επιμέρους δραστηριότητες ενός έργου απαιτούν την διάθεση διαφορετικών ειδών πόρων με διάρκεια χρησιμοποίησης τους ανάλογη του μεγέθους και της πολυπλοκότητας της δραστηριότητας. Η Κατανομή Πόρων περιλαμβάνει δύο βασικές κατηγορίες μέσω των οποίων επιχειρείται βελτιστοποίηση της πορείας εκτέλεσης των δραστηριοτήτων λαμβάνοντας υπόψη πιθανούς περιορισμούς.

Στον Προγραμματισμό Πόρων, υπάρχει περιορισμός στην καθημερινή χρήση πόρων και η βελτιστοποίηση αφορά την εύρεση της συντομότερης συνολικής διάρκειας του έργου ενώ στην Εξομάλυνση Πόρων επιχειρείται η όσο δυνατόν ομοιόμορφη χρήση πόρων κατά την χρονική διάρκεια του έργου η οποία παραμένει σταθερή.

### **4.4 Εξομάλυνση Πόρων**

Αφού σχεδιαστεί το δίκτυο εργασιών, οι πόροι διατίθενται στις εργασίες ανάλογα με την φύση τους και σύμφωνα με την απαιτούμενη ποσότητα. Η γραφική απεικόνιση της διάθεσης πόρων ανά ημέρα γίνεται μέσω του γραφήματος προφίλ πόρων. Ο κάθετος άξονας του γραφήματος αναπαριστά το ποσό για κάθε είδος πόρου που απαιτείται για κάθε εργασία ενώ στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι συνολικές ημέρες διάρκειας του έργου.



Ορόσημο στην επιστήμη της Διοίκησης Έργου αποτελεί η μέθοδος της Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Method). Η επίλυση του δικτύου με την Μέθοδο Κρίσιμου Μονοπατιού (Critical Path Method) προσφέρει την πληροφορία ως προς την συνολική διάρκεια του Έργου η οποία είναι ίση με την συνολική διάρκεια των κρίσιμων εργασιών. Η ημερομηνία έναρξης και το πέρας των κρίσιμων εργασιών δεν δύναται να μεταβληθούν ενώ οι υπόλοιπες εργασίες χαρακτηρίζονται ως μη-κρίσιμες και υπόκεινται σε μεταβολή, προκειμένου να εξυπηρετηθεί ο σκοπός της Εξομάλυνσης Πόρων. Η μετακίνηση της χρονικής στιγμής έναρξης μη-κρίσιμων δραστηριοτήτων, δεν επιφέρει αλλαγή στην συνολική διάρκεια του έργου εφόσον αυτή γίνει μέσα στα επιτρεπτά περιθώρια που προκύπτουν από την ανάλυση του δικτύου των εργασιών.

Τηρώντας τον περιορισμό της σταθερής συνολικής διάρκειας του Έργου, επιχειρείται η βελτίωση του αρχικού Προφίλ Πόρων στοχεύοντας τόσο σε μείωση των μεγίστων και ελαχίστων χρήσεων πόρων ανά ημέρα χρήσης όσο και σε μείωση της μεταβολής χρήσης πόρων σε διαδοχικές ημέρες. Η εφαρμοζόμενη διαδικασία Εξομάλυνσης επικεντρώνεται στην εύρεση των ημερομηνιών έναρξης των μη-κρίσιμων δραστηριοτήτων ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια αξιολόγησης των προφίλ πόρων.

#### **4.4.1 Αναλυτική επίλυση του προβλήματος Εξομάλυνσης Πόρων**

Η αναλυτική επίλυση του προβλήματος Εξομάλυνσης Πόρων για κάποιο έργο στην πράξη γίνεται με την χρήση κάποιου κατάλληλου εμπορικού λογισμικού όπως το Microsoft Project. Βασίζόμενοι στις αρχές της μεθόδου της Κρίσιμης Διαδρομής, παρατίθενται τα βήματα της λειτουργίας του αλγορίθμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναλυτική επίλυση.

Αρχικά μέσω της μεθόδου της Κρίσιμης Διαδρομής υπολογίζονται τα περιθώρια των δυνατών χρονικών ενάρξεων για κάθε δραστηριότητα. Οι δραστηριότητες, για τις οποίες η νωρίτερη δυνατή χρονικά έναρξη τους (Early Start-ES) ταυτίζεται με την αργότερη δυνατή χρονικά λήξη τους (Late Start-LS), προσδιορίζονται ως κρίσιμες. Οι υπόλοιπες δραστηριότητες χαρακτηρίζονται ως μη-κρίσιμες και η έναρξη τους μπορεί να μεταβληθεί μεταξύ του αντίστοιχου διαστήματος νωρίτερης και αργότερης έναρξης που ορίστηκε για κάθε μία.

Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται το διάγραμμα ES που περιέχει τις ενωρίτερες ενάρξεις για κάθε μη-κρίσιμη δραστηριότητα και αντίστοιχα το διάγραμμα LS το οποίο περιέχει τις αργότερες δυνατές ενάρξεις για κάθε δραστηριότητα. Ο σκοπός της αναλυτικής επίλυσης είναι να προσδιοριστούν οι δυνατές τιμές έναρξης για κάθε μη κρίσιμη δραστηριότητα, οι οποίες θα προσφέρουν την βέλτιστη εξομάλυνση πόρων ως προς το χαρακτηριστικό το οποίο επιλέχθηκε προς βελτιστοποίηση. Εκκινώντας από την μη-κρίσιμη δραστηριότητα που εκκινεί τελευταία χρονικά, αυξάνεται η τιμή της νωρίτερης εκκίνησης της κατά +1 και εξετάζεται εάν τηρούνται οι χρονικοί περιορισμοί, δηλαδή να ανήκει η νέα έναρξη στο διάστημα ανάμεσα στην νωρίτερη

και την αργότερη έναρξη για αυτή την δραστηριότητα. Η βηματική μοναδιαία αύξηση ολοκληρώνεται στο σημείο όπου η έναρξη της τελευταίας μη-κρίσιμης δραστηριότητας λάβει την τιμή της αργότερης έναρξης. Στα βήματα αύξησης, γίνεται έλεγχος κατά πόσο η νέα τιμή έναρξης της δραστηριότητας είναι επιτρεπτή ως προς την εξάρτηση του χρόνου έναρξης της εξεταζόμενης δραστηριότητας από την ολοκλήρωση των προαπαιτούμενων εργασιών της. Δηλαδή εξετάζονται εάν τηρούνται οι κανόνες συσχέτισης αρχής-τέλους (Finish to Start-FS) κάθε εργασίας από την προηγούμενη εργασία, εφόσον η επόμενη εργασία έχει δηλωθεί ως εξαρτώμενη από κάποια προηγούμενη εργασία και αποθηκεύονται οι λύσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς.

Όταν αποθηκευτούν όλες οι δυνατές τιμές έναρξης για την τελευταία μη κρίσιμη δραστηριότητα, η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την αμέσως προηγούμενη μη-κρίσιμη δραστηριότητα και ολοκληρώνεται με την αποθήκευση των τιμών έναρξης για την πρώτη μη-κρίσιμη δραστηριότητα.

Γίνεται αντιληπτό ότι σε κάθε δυνατή λύση, αντιστοιχεί και ένα προφίλ πόρων. Ο συνολικός αριθμός προφίλ πόρων αυξάνεται εκθετικά όσο αυξάνεται ο αριθμός και η διάρκεια των δραστηριοτήτων σε ένα έργο. Οπότε η εύρεση της βέλτιστης λύσης για κάθε κριτήριο αξιολόγησης των δυνατών προφίλ πόρων απαιτεί μεγάλα ποσά υπολογιστικού χρόνου.

#### **4.4.2 Άλλες Μέθοδοι Επίλυσης Προβλημάτων Εξομάλυνσης Πόρων**

Η εφαρμογή των καταλληλότερων κατάλληλων μεθόδων για το πρόβλημα της εξομάλυνσης των πόρων που χρησιμοποιούνται από τις εργασίες, εξαρτάται από το μέγεθος και την πολυπλοκότητα των εργασιών που περιλαμβάνει το υπό εξέταση έργο και αντιμετωπίστηκε με Μαθηματικές Τεχνικές, Ευρετικές Προσεγγίσεις και Εξελικτικούς Αλγορίθμους.

Οι Μαθηματικές Τεχνικές εφαρμόστηκαν κυρίως σε μικρά έργα (της τάξης των 20 δραστηριοτήτων) και απέδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα για έργα αυτού του μεγέθους. Εντούτοις καταναλώνουν αρκετό υπολογιστικό χρόνο για να καταλήξουν στην βέλτιστη λύση και συνήθως δεν εντοπίζουν την βέλτιστη λύση σε πολυπλοκότερα έργα.

Από την άλλη, κατά την εφαρμογή τους σε μικρά και μεσαίου μεγέθους έργα, οι Ευρετικοί Αλγόριθμοι απαιτούν μικρότερα ποσά υπολογιστικού χρόνου αλλά δεν παράγουν λύσεις υψηλής ποιότητας, εστιάζοντας στην παραγωγή εφικτών λύσεων, οι οποίες ταυτόχρονα ικανοποιούν τους περιορισμούς.

Η προσέγγιση της βέλτιστης λύσης μέσω εφαρμογής Εξελικτικών Αλγορίθμων αποτελεί την πιο πρόσφατη κατηγορία αντιμετώπισης για την επίλυση προβλημάτων Εξομάλυνσης Πόρων ανεξάρτητα από το μέγεθος των έργων στα οποία εφαρμόστηκαν καθώς επιτεύχθηκαν

ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μικρά, μεσαία αλλά και μεγάλα έργα. Οι στρατηγικές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης είναι εμπνευσμένοι από φυσικές διαδικασίες και καθοδηγώντας ευρετικές μεθόδους δύνανται να επιτυγχάνουν την εύρεση λύσεων πλησίον των βέλτιστων με μικρότερες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο.

#### **4.5 Πληθυσμός και Γενιές σε Εξελικτικούς αλγορίθμους**

Δύο σημαντικές παράμετροι απαντώνται στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους: ο πληθυσμός (population) και οι γενιές (generations). Ο πληθυσμός αποτελεί το σύνολο των υποψήφιων λύσεων (candidate solutions) σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου.

Οι γενιές αναπαριστούν τις επαναλήψεις που θα εκτελεστούν από τον αλγόριθμο έως τον τερματισμό της εφαρμογής του. Στους Εξελικτικούς Αλγόριθμους διατηρείται σταθερό το πλήθος αναζητητών και κεντρική ιδέα αποτελεί η δημιουργία καλύτερων λύσεων που βασίζονται σε πληροφορία που παρέχεται από την εύρεση προηγούμενων λύσεων. Μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας, οι αναζητητές μετακινούνται στο χώρο λύσεων έως την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού, το οποίο συνήθως είναι ο εξ' αρχής οριζόμενος μέγιστος αριθμός επαναλήψεων.

#### **4.6 Εξερεύνηση και εκμετάλλευση χώρου λύσεων**

Η σάρωση όσο δυνατόν μεγαλύτερου χώρου από τον διαθέσιμο χώρο λύσεων προς εντοπισμό της βέλτιστης λύσης ονομάζεται εξερεύνηση (exploration) ενώ κατά την εκμετάλλευση (exploitation) η προσπάθεια σάρωσης όσο δυνατόν περισσότερου χώρου επικεντρώνεται γύρω από μία βέλτιστη ή οριακά βέλτιστη (near optimal) λύση. Στόχος είναι να υπάρξει ισορροπία μεταξύ εξερεύνησης και εκμετάλλευσης ώστε να εντοπίζονται γρήγορα οι βέλτιστες λύσεις.

##### **4.6.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι**

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αναζητούν βέλτιστες λύσεις βασίζοντας την λογική των κανόνων λειτουργίας τους στην επιστήμη της Γενετικής. Σε αντιστοιχία με την Γενετική, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έχουν ως δομικό στοιχείο το χρωμόσωμα, το οποίο αναπαρίσταται από συμβολοσειρά σταθερού μεγέθους και αποτελεί ένα μέλος πληθυσμού.

Τα ικανότερα μέλη του πληθυσμού (διαδικασία της Επιλογής) διασταυρώνονται (διαδικασία της Διασταύρωσης) και παράγουν απογόνους που διαθέτουν μεγάλο μέρος του γενετικού υλικού των γονέων τους καθώς και κάποιες μεταλλάξεις (διαδικασία της Μετάλλαξης), πρακτική που είναι ταυτόσημη με την θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών, παράγοντας έτσι σταδιακά ικανότερους πληθυσμούς.

Κάθε χρωμόσωμα μπορεί να αναπαριστά τους επιτρεπόμενους από τους περιορισμούς χρόνους έναρξης για κάθε μη κρίσιμη δραστηριότητα. Ορίζοντας τον αρχικό πληθυσμό μέσω των σταδίων της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, παράγονται οι βελτιωμένοι γενετικά απόγονοι του αρχικού πληθυσμού.

Κατά τη διαδικασία της Επιλογής, επιλέγεται τυχαία (με πιθανότητα διασταύρωσης  $P_c$ ) ένα χρωμόσωμα για να διασταυρώσει το γενετικό του υλικό με ένα καλύτερης ποιότητας χρωμόσωμα ίδιας γενιάς παράγοντας ένα νέο χρωμόσωμα που φέρει γενετικό υλικό και από τους δύο γονείς του. Η διαδικασία της Μετάλλαξης κρίθηκε απαραίτητο να εφαρμοστεί καθώς εάν εξαλειφθεί αυτό το βήμα, οι πληθυσμοί που προκύπτουν μετά από λίγες γενιές, περιέχουν γενετικό υλικό σε μεγάλο ποσοστό από τους ικανότερους γονείς. Αυτό σημαίνει από μαθηματικής άποψης, ότι οι παραγόμενες γενιές εστιάζουν γύρω από τοπικά ακρότατα και ο αλγόριθμος συγκλίνει πρόωρα εξερευνώντας ένα μικρό μέρος του συνόλου των εφικτών λύσεων.

#### 4.6.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Η έννοια της βελτιστοποίησης αφορά την εύρεση των τιμών των παραμέτρων μίας μαθηματικής συνάρτησης για τις οποίες η τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποιείται ή μεγιστοποιείται. Αναλύεται σε ολική βελτιστοποίηση και τοπική βελτιστοποίηση.

Όσον αφορά την εύρεση ολικού βέλτιστου για μία συνάρτηση  $f(x)$  με πεδίο ορισμού  $A$ , αυτό έγκειται στην εύρεση μίας τιμής  $x_a$  για την οποία ισχύει η σχέση:

$$f(x_a) \leq f(x) \forall x \in A$$

Ενώ για το τοπικό βέλτιστο με  $B \subseteq A$ , ισχύει η σχέση:

$$f(x_a) \leq f(x) \forall x \in B$$

Για την μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος της Εξομάλυνσης Πόρων, ένα έργο ορίζεται ως ένα σύνολο  $A$  που περιέχει  $n$  δραστηριότητες:

$$A = \{1, 2, \dots, n\}$$

Η δραστηριότητα 1 και η δραστηριότητα  $n$  είναι αντίστοιχα η εργασία που ξεκινάει πρώτη χρονικά ενώ η  $n$  εργασία εκκινεί τελευταία χρονικά σε σχέση με τις υπόλοιπες εργασίες του έργου. Αντίθετα με τις υπόλοιπες, οι δραστηριότητες 1 και  $n$  λογίζονται ως άυλες, με μηδενική χρονική διάρκεια ( $d_i$ ) και δεν απαιτούν ημερήσια χρήση πόρων ( $r_i$ ).

Σε κάθε ημέρα διάρκειας  $t$  του έργου με συνολική διάρκεια  $T$  ημέρες, όπου  $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ , η συνολική χρήση πόρων υπολογίζεται ως το άθροισμα των πόρων που απαιτούνται για το σύνολο των εργασιών  $i$  οι οποίες βρίσκονται σε εκτέλεση κατά την ημέρα  $t$  ως εξής:

$$\mathbf{F}(t) = \sum_{i \in \{1, \dots, n\}} r_i(t) \quad 4-1$$

Συμβολίζοντας με  $R$  την ημερήσια χρήση των πόρων και με  $RL$  την συνάρτηση αξιολόγησης ενός προφίλ πόρων, η γενική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος της Εξομάλυνσης Πόρων ορίζεται ως:

$$\text{Minimize } R = RL(S(t)) \quad 4-2$$

Όπου  $S$  είναι η χρονική στιγμή έναρξης εκτέλεσης της μίας δραστηριότητας. Η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να ικανοποιεί τους φυσικούς περιορισμούς που προκύπτουν από τον ορισμό των μεταβλητών της, οπότε ισχύει ότι  $1 \leq t \leq T$  και  $F(t) \geq 0$ .

Κατά την κατασκευή του Δικτύου Δραστηριοτήτων του έργου με την Μέθοδο Κρίσιμης Διαδρομής, προκύπτουν και οι περιορισμοί χρονικοί για κάθε εργασία  $i$ , η οποία δεν μπορεί να εκκινήσει εάν δεν έχει ολοκληρωθεί η προηγούμενη εξαρτώμενη δραστηριότητα. Ταυτόχρονα, υπολογίζονται οι νωρίτεροι και αργότεροι χρόνοι έναρξης για κάθε δραστηριότητα  $I$  (Early Start- $ES_i$  και Late Start- $LS_i$ ) οι οποίοι αποτελούν τα κάτω και άνω όρια της δυνατής περιοχής εντός της οποίας μπορεί να τοποθετηθεί η χρονική στιγμή έναρξης για κάθε δραστηριότητα.

Στην Βιβλιογραφία έχει γίνει χρήση επτά διαφορετικών συναρτήσεων στα πλαίσια της Εξομάλυνσης Πόρων ανάλογα με την ακριβή στόχευση ως προς το μέγεθος που ζητείται να βελτιστοποιηθεί για να εξυπηρετηθούν οι διάφορες ανάγκες κατά την εκτέλεση του έργου.

Η ελαχιστοποίηση χρήσης των απαιτούμενων πόρων περιγράφεται από την (4-3):

$$\mathbf{G}_f = \max\{F(t), t = 1, 2, \dots, T\} \quad 4-3$$

Η διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της επιθυμητής χρήσης  $RLI$ , ώστε να ελαχιστοποιείται η χρήση των πόρων που αποκλίνουν από την μέση χρήση είναι η (2):

$$\mathbf{RLI} = \sum_{t \in \{1, 2, \dots, T\}} \left| \left( \sum_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} r_i(t) \right) - \left( \frac{\sum_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} r_i d_i}{T} \right) \right| \quad 4-4$$

Το κριτήριο της τυπικής απόκλισης ελέγχει την απόκλιση της χρήση των πόρων σε ολόκληρο το προφίλ πόρων είναι η (4-5):

$$\mathbf{StD} = \frac{1}{T-1} \sum_{i \in \{1, 2, \dots, n\}, t \in \{1, 2, \dots, T\}} \left( \left( \sum_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} r_i(t) \right) - \left( \frac{\sum_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} r_i d_i}{T} \right) \right)^2 \quad 4-5$$

Η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης των προφίλ των πόρων από ημέρα σε ημέρα εκφράζεται από την (4-6):

$$\mathbf{R}^2(t) = \sum_{i \in \{1, 2, \dots, n\}, t \in \{1, 2, \dots, T\}} r_i(t)^2 \quad 4-6$$

Το κριτήριο Step (4-7), επιλέγει ως καλύτερα προφίλ αυτά που δεν έχουν μεγάλη διαφορά στην χρήση των πόρων την χρονική στιγμή  $t$  από την  $t-1$ :

$$STEP = \sum_{t \in \{1,2,\dots,T\}} |F(t) - F(t-1)| \quad 4-7$$

Η συνάρτηση RIC (4-8), επιλέγει ως καλύτερα προφίλ αυτά με το μικρότερο πηλίκιο, του πολλαπλασιασμού της διάρκειας του έργου με το τετράγωνο της ημερήσιας χρήσης, δια του τετραγώνου του αθροίσματος των πόρων όλου του προφίλ:

$$RIC = \sum_{t \in \{1,2,\dots,T\}} (T * R^2(t) / F(t))^2 \quad 4-8$$

Τελευταίο κριτήριο (7) αποτελεί η εντροπία, η οποία εξάγοντας τις μικρότερες τιμές οδηγεί εμφανώς σε πιο ομοιόμορφα προφίλ :

$$F(t) = \sum_{i \in \{1,2,\dots,n\}} \{ [ri / \sum_{i=1}^n ri] \ln(ri / \sum_{i=1}^n ri) \} \quad 4-9$$

Οι επτά (7) μαθηματικές συναρτήσεις μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα το χαρακτηριστικό του πόρου που επιχειρείται να βελτιωθεί η κατανομή.

Τα χαρακτηριστικά ενός πόρου είναι :

- 1) Το κόστος (μικρό / υψηλό)
- 2) Η διαθεσιμότητα (επαρκής / ανεπαρκής)
- 3) Η ανάγκη για μεταφορά (εύκολη / δύσκολη)

Και αντίστοιχα, οι στόχοι της βελτιστοποίησης καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά των πόρων :

A) Όταν στόχος είναι η μείωση της μέγιστης ημερήσιας χρήσης πόρων σε ένα προφίλ πόρων γίνεται χρήση των συναρτήσεων:  $Gf$ ,  $R^2$  και  $RIC$  και επιχειρείται η μείωση της μέγιστης ημερήσιας διαθεσιμότητας του πόρου, εξοικονομώντας έτσι κόστος για αγορά ή ενοικίαση επιπλέον πόρων ή την χρησιμοποίηση των περισσευόμενων πόρων σε άλλα έργα που εκτελούνται παράλληλα. Η εφαρμογή αυτής της μείωσης θα είχε σημαντικά οφέλη σε πόρους οι οποίοι είναι ακριβοί.

B) Όταν στόχος είναι η χρήση της ημερήσιας απαίτησης σε πόρους πλησιέστερα στη μέση χρήση πόρων χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις:  $RLI$  και  $StD$ .

Αναζητούνται προφίλ πόρων όπου η ημερήσια χρήση πόρων προσεγγίζει την μέση χρήση σε πόρους (προφίλ πόρων με ομοιόμορφη χρήση σε όλη τη διάρκεια του έργου). Αφορά πόρους σχετιζόμενους με το ανθρώπινο δυναμικό.

Γ) Όταν στόχος είναι η διατήρηση της ημερήσιας χρήσης σε πόρους στα ίδια επίπεδα ανάμεσα σε διαδοχικές χρονικές στιγμές, χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις Step και EV.

Οι μαθηματικές συναρτήσεις αναζητούν προφίλ πόρων στα οποία υπάρχει η μικρότερη διαφοροποίηση στη χρήση των πόρων ανάμεσα σε διαδοχικές χρονικές στιγμές. Εφαρμογή υπάρχει σε πόρους οι οποίοι απαιτούνται για την εκτέλεση παράλληλων έργων από τον ίδιο κατασκευαστή. Με την σταθερή ημερήσια χρήση σε ένα τέτοιο παράδειγμα θα υπήρχε εξοικονόμηση κόστους μεταφοράς.

## 5 Μέθοδοι Επίλυσης του Προβλήματος

### 5.1 Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό (Sonar Inspired Optimization)

Το σύστημα Sonar σαρώνει με υπερήχους τον υποθαλάσσιο χώρο και εκτιμώντας την ένταση των ανακλώμενων υπερηχητικών σημάτων που επιστρέφουν στον δέκτη, απεικονίζεται η απόσταση και το σχήμα των εμποδίων τα οποία βρίσκονται στο χώρο σάρωσης, ο οποίος αποτελεί μία νοητή σφαίρα γύρω από τα πλοία - εκπομπούς του σήματος. Όσο η ένταση του εκπεμπόμενου σήματος μειώνεται, τόσο αυξάνει η περιοχή που σαρώνεται και αυτή η λειτουργία προσομοιώνεται κατά την εφαρμογή των βημάτων της μεθόδου Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό (Sonar Inspired Optimization).

Οι πομποί των σημάτων αποτελούν τους αναζητητές (agents) με προκαθορισμένο σταθερό πλήθος  $n$  και οι θέσεις τους αρχικοποιούνται κάπου στον χώρο λύσεων. Κάθε αναζητητής θεωρείται ως λύση  $X_i$ :

$$X_i = \{st_i^1, st_i^2, \dots, st_i^n\} \quad 5-1$$

Όπου  $st_i^j$  αναπαριστά την ημέρα έναρξης της εργασίας  $j$  για τον αναζητητή  $i$  με  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  και  $N$  ο μέγιστος αριθμός αναζητητών ενώ  $n$  είναι ο μέγιστος αριθμός εργασιών.

Οι λύσεις που θα παραχθούν πρέπει να περιορίζονται στο χώρο εφικτών λύσεων. Εφόσον αναπαριστούν τις αντίστοιχες ημέρες έναρξης για κάθε μη-κρίσιμη δραστηριότητα  $j$ , είναι χρήσιμο να μην γίνεται σπατάλη υπολογιστικού χρόνου για την εύρεση λύσεων που δεν είναι εφικτές. Έτσι κάθε εργασία  $j$ , μπορεί να εκκινήσει να εκτελείται στο αντίστοιχο διάστημα που ορίζεται για αυτήν, όπως προέκυψε από την ανάλυση των δεδομένων του έργου με την μέθοδο της Κρίσιμης Διαδρομής. Το επιτρεπτό διάστημα λύσεων για κάθε εργασία περιορίζεται χρονικά εντός της περιοχής Νωρίτερης Εκκίνησης (ES) και Αργότερης Εκκίνησης (LS) για κάθε εργασία. Τίθενται οι εξής περιορισμοί υπό την μορφή εξισώσεων:

$$upper\_bound^j = ES^j \quad 5-2$$

$$lower\_bound^j = LS^j$$

Όπου  $upper\_bound^j$  αναπαριστά το κατώτερο όριο έως το οποίο μπορεί να λάβει τιμή η έναρξη της εργασίας  $j$  και ταυτίζεται με την τιμή της Νωρίτερης Έναρξης για την εργασία  $j$  ( $ES^j$ ), όπως προέκυψε από την μέθοδο της Κρίσιμης Διαδρομής. Αντίστοιχα το  $lower\_bound^j$  αναπαριστά το ανώτερο χρονικό όριο έναρξης της εργασίας  $j$  και ταυτίζεται με την τιμή της Αργότερης Έναρξης για την εργασία  $j$  ( $LS^j$ ).



Ενσωματώνοντας τους περιορισμούς του άνω και κάτω ορίου για κάθε λύση στο μηχανισμό αναζήτησης, οι λύσεις παράγονται ως ακολούθως:

$$st_i^j = lower\_bound^j + (upper\_bound^j - lower\_bound^j) \cdot rand \quad 5-3$$

Όπου  $st_i^j$  αναπαριστά την ημέρα έναρξης της εργασίας  $j$  για τον αναζητητή  $i$ ,  $upper\_bound^j$  η τιμή της Νωρίτερης Έναρξης για την εργασία  $j$  ( $ES^j$ ),  $lower\_bound^j$  η τιμή της Αργότερης Έναρξης για την εργασία  $j$  ( $LS^j$ ).

Σε περιπτώσεις εφαρμογής της Βελτιστοποίησης σε έργα τα οποία έχουν εξαρτώμενες δραστηριότητες, πρέπει να εισαχθεί και αντίστοιχος περιορισμός κατά την αναζήτηση λύσεων ώστε να παράγονται μόνο εφικτές λύσεις. Η λογική των εξαρτώμενων εργασιών από σχέση της μορφής Τέλους-Αρχής (Finish to Start) είναι ότι μία εργασία που έχει ως προαπαιτούμενο να ολοκληρωθεί μία προηγούμενη εργασία, δεν μπορεί να εκκινήσει εάν προηγουμένως δεν τερματίσει η προηγούμενη εργασία. Για να ικανοποιείται και αυτός ο περιορισμός, εισάγεται και ένα προσωρινό όριο (temporary lower bound):

$$st_i^j = temporary\_lower\_bound^j + (upper\_bound^j - lower\_bound^j) \cdot rand \quad 5-4$$

Όπου το  $temporary\_lower\_bound^j$  αποτελεί την μέγιστη τιμή του αθροίσματος των χρόνων έναρξης και διάρκειας μεταξύ των εργασιών που αποτελούν προαπαιτούμενες της εργασίας  $j$  και συνδέονται με αυτήν με σχέση εξάρτησης Τέλους-Αρχής και υπολογίζεται ως εξής:

$$temporary\_lb_j = \max\{st_k^j + duration_k + FS_k^j, k \in (\text{Προαπαιτούμενες Εργασίες})\} \quad 5-5$$

Όπου το  $st_k^j$  αναπαριστά την τιμή για την έναρξη της εργασίας  $k$ , η οποία είναι προαπαιτούμενη της εργασίας  $j$ , με διάρκεια  $duration_k$  και συνδέεται με την εργασία  $j$  με σχέση εξάρτησης Τέλους-Αρχής  $FS_k^j$ .

Ο μηχανισμός διόρθωσης πρέπει να εξασφαλίζει για κάθε λύση ότι ανήκει μεταξύ του κάτω και άνω ορίου για κάθε εργασία δηλαδή να τηρείται:

$$lb^j \leq st_i^j \leq ub^j \quad 5-6$$

Οπότε, εφόσον απαιτείται η τελική μορφή του μηχανισμού διόρθωσης είναι η εξής:

$$st_i^j = temporary\_lb^j + (ub^j - lb^j) \cdot \cos(st_i^j) \quad 5-7$$

Ορίζονται οι αρχικές τιμές της ακτίνας και της έντασης για κάθε αναζητητή και υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση για κάθε προκύπτουσα λύση και αποθηκεύεται η καλύτερη εξ αυτών.

Στη συνέχεια οι αναζητητές που εντοπίζουν καλύτερη από την προηγούμενη λύση, μειώνουν την ένταση τους ώστε να εξερευνηθεί ο χώρος γύρω από αυτήν ενώ εάν δεν βρει καλύτερη από την υπάρχουσα λύση αυξάνεται η ένταση του ώστε να εκτελέσει μεγαλύτερα άλματα στο χώρο των λύσεων. Εφόσον η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ενός αναζητητή είναι κάτω από τον μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών όλων των αναζητητών, η θέση του καθορίζεται από την σχέση:

$$x_i^j = best^j + r_0^j \cdot rand \quad 5-8$$

Όπου  $best^j$  είναι η καλύτερη λύση που έχει βρεθεί μέχρι στιγμής ως τιμή έναρξης της εργασίας  $j$  και  $r_0^j$  η ακτίνα που αντιστοιχεί στην καλύτερη λύση.

Σε διαφορετική περίπτωση ο αναζητητής επανατοποθετείται τυχαία στο χώρο μέσω της σχέσης:

$$x_i^j = lower\_bound^j + (upper\_bound^j - lower\_bound^j) \cdot rand \quad 5-9$$

Η επανατοποθέτηση (checkpoint) των αναζητητών γίνεται στο πλαίσιο της γενικότερης προσπάθειας που επιχειρείται μέσω των Νοημόνων μεθόδων να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της εκμετάλλευσης και της εξερεύνησης. Τροποποιώντας την διαδικασία Μετάλλαξης (mutation rate) που αναλύθηκε κατά την αναφορά στον Γενετικό Αλγόριθμο, στην παρούσα περίπτωση όταν υπάρχουν επαναλήψεις χωρίς αλλαγή σε ποσοστό  $\mu\%$  (συνήθως 5%), ενεργοποιείται η διαδικασία επανατοποθέτησης των αναζητητών ώστε η αναζήτηση να μην εγκλωβιστεί σε τοπικά βέλτιστα, συγκλίνοντας πρόωρα προς αυτές τις λύσεις. Ο αλγόριθμος τερματίζεται μετά από προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων, οι οποίες στην προκείμενη περίπτωση ονομάζονται πλήθος σαρώσεων (number of scans).

Στο σημείο ελέγχου (checkpoint) ελέγχεται εάν υπάρχει βελτίωση της λύσης κατά τις διαδοχικές επαναλήψεις των βημάτων του αλγορίθμου (generations) ως ακολούθως:

$$checkpoint = generations \cdot \mu$$

Στην Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό, έγινε εφαρμογή του περιεχόμενου στην μέθοδο μηχανισμού επανατοποθέτησης των λύσεων που δεν βελτιώνουν τη θέση τους όπου κριτήριο επιλογής του τρόπου επανατοποθέτησης είναι το αν η ποιότητα του αναζητητή που επανατοποθετείται είναι μεγαλύτερη από τη μέση ποιότητα του πληθυσμού.

Ο Ψευδοκώδικας της μεθόδου φαίνεται στον **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

#### Ψευδοκώδικας 1: Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό

---

1: Αρχικοποίηση αναζητητών

- 
- 2: Αρχικοποίηση Ενεργού Ακτίνας και Έντασης κάθε αναζητητή
  - 3: **Όσο** κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται
  - 4: **Εάν** μετρητής επαναλήψεων χωρίς καλύτερη λύση=στιγμή επανατοποθέτησης
  - 5: Επανατοποθέτηση αναζητητή
  - 6: Επανυπολογισμός Έντασης και Ενεργού Ακτίνας
  - 7: **Τέλος εάν**
  - 8: Ενημέρωση Ακτίνας για κάθε αναζητητή
  - 9: Υπολογισμός Έντασης για κάθε αναζητητή
  - 10: **Όσο** Σάρωση Πλήρους Κύκλου δεν έχει ολοκληρωθεί
  - 11: Ενημέρωση της Γωνίας Περιστροφής για κάθε διάσταση
  - 12: Υπολογισμός της Αντικειμενικής Συνάρτησης για πιθανή νέα θέση
  - 13: Αποθήκευση της καλύτερης τιμής Αντικειμενικής Συνάρτησης για τα μέχρι τώρα βήματα της Σάρωσης
  - 14: **Τέλος**
  - 15: Ενημέρωση καλύτερης λύσης και Αντικειμενικής Συνάρτησης
  - 16: Ενημέρωση Έντασης και Σήματος Εκπομπής για κάθε αναζητητή
  - 17: **Τέλος**
- 

## 5.2 Υβριδικό Σχήμα Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό (Sonar Inspired Optimization - SIO) και Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing-SA)

Εισάγοντας την μέθοδο της Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing-SA) στον μηχανισμό ελέγχου των λύσεων που παράγονται από την Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό (Sonar Inspired Optimization-SIO) προέκυψε το υβριδικό σχήμα SIO-SA. Η ανάγκη για αποφυγή της πρόωρης σύγκλισης σε τοπικά βέλτιστες λύσεις ήταν αυτή που ώθησε στην δημιουργία του υβριδικού σχήματος ώστε να γίνει ενσωμάτωση και των ιδιοτήτων της μεθόδου της Προσομοιωμένης Ανόπτησης στην μέθοδο της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό.

Στην γνωστή μέθοδο της Προσομοιωμένης Ανόπτησης, χρησιμοποιείται το κριτήριο Metropolis (Metropolis Criterion) όπου γίνονται δεκτές χειρότερες λύσεις με πιθανότητα  $p$  ώστε να επιτευχθεί διαφοροποίηση των λύσεων. Η πιθανότητα  $p$  υπολογίζεται ως εξής:

$$p = e^{-\frac{q_{best}-q_i}{T}} \quad 5-10$$

Όπου  $q_{best}$  είναι η ποιότητα της καλύτερης λύσης που έχει βρεθεί για την Αντικειμενική Συνάρτηση,  $q_i$  είναι η ποιότητα του αναζητητή  $i$  και με  $T$  αναπαρίσταται η εξέλιξη της παραμέτρου της θερμοκρασίας στην μέθοδο της Προσομοιωμένης Ανόπτησης ( $T$ ), η οποία μειώνεται βηματικά κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου με ρυθμό  $r_T$ :

$$T_k = T_{k-1} \cdot r_T \quad 5-11$$

Στο υβριδικό σχήμα, αυτή η πιθανότητα  $p$  καθορίζει αν ο αναζητητής θα επανατοποθετηθεί σε τυχαία νέα θέση ενισχύοντας την εξερεύνηση ή αν θα λάβει θέση στο

χώρο πλησίον της ήδη γνωστής καλύτερης λύσης προς αύξηση της εκμετάλλευσης. Στις αρχικές επαναλήψεις της υβριδικής μεθόδου ο αναζητητής επανατοποθετείται με αυξημένη πιθανότητα σε τυχαία θέση οπότε επιτυγχάνεται υψηλό ποσοστό εξερεύνησης ενώ σε επόμενες επαναλήψεις αυξάνεται η πιθανότητα να επανατοποθετηθεί γύρω από την καλύτερη μέχρι τότε λύση εστιάζοντας σε αυτό τον χώρο. Ο ψευδοκώδικας της μεθόδου υβριδικού σχήματος Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό και Προσομοιωμένης Ανόπτησης (SIO-SA) παρατίθεται στον Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..

### Ψευδοκώδικας 2. Υβριδικού Σχήματος ΒΕΗ-ΠΑ

---

- 1: **Όσο** κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται
  - 2:     **Εάν** συνεχόμενα βήματα χωρίς βελτίωση λύση =σημείο ελέγχου
  - 3:     **Εάν**  $\text{rand} \leq p$  (Πιθανότητα από Κριτήριο Metropolis)
  - 4:     Επανατοποθέτηση αναζητητή σε τυχαίο χώρο
  - 5:     **Αλλιώς**
  - 6:     Επανατοποθέτηση αναζητητή με βάση την καλύτερη λύση
  - 7:     **Τέλος**
  - 8:     Υπολογισμός Έντασης και Ακτίνας για κάθε αναζητητή
  - 9:     **Τέλος**
  - 10: **Όσο** Σάρωση Πλήρους Κύκλου δεν έχει ολοκληρωθεί
  - 11:     Ενημέρωση της Γωνίας Περιστροφής για κάθε διάσταση
  - 12:     Υπολογισμός της Αντικειμενικής Συνάρτησης για πιθανή νέα θέση
  - 13:     Αποθήκευση της καλύτερης τιμής Αντικειμενικής Συνάρτησης για τα μέχρι τώρα βήματα της Σάρωσης
  - 14:     **Τέλος**
  - 15:     Ενημέρωση καλύτερης λύσης και Αντικειμενικής Συνάρτησης
  - 16:     Ενημέρωση Έντασης και Σήματος Εκπομπής για κάθε αναζητητή
  - 17: **Τέλος**
-

## 6 Πειραματική Διαδικασία

### 6.1 Ανάλυση Δεδομένων Προβλήματος Κατασκευής Υποσταθμού

Τα δεδομένα στην τελική μορφή τους προς επεξεργασία παρουσιάζονται στον Πίνακα **Δεδομένων Εργασιών Κατασκευής Υποσταθμού**. Αναλυτικότερα στην στήλη “A/A” κάθε μία δραστηριότητα συμβολίζεται με αύξοντα αριθμό και αντιστοιχίζεται στην στήλη “dd” με την διάρκεια της, ενώ στην στήλη “rr” καταγράφονται οι πόροι οι οποίοι δεσμεύονται από κάθε δραστηριότητα.

Στην στήλη “P” καταγράφονται οι άμεσα προηγούμενες δραστηριότητες κάθε εργασίας και τέλος στην στήλη “FS” εμφανίζεται (σε ημέρες) η προπορεία έναρξης της επόμενης δραστηριότητας σε σχέση με το τέλος της αμέσως προηγούμενης της (αρνητικοί αριθμοί: σχέση της μορφής FS-) ή καθυστέρηση έναρξης της επόμενης δραστηριότητας σε σχέση με το τέλος της προηγούμενης (θετικοί αριθμοί: σχέση της μορφής FS+).

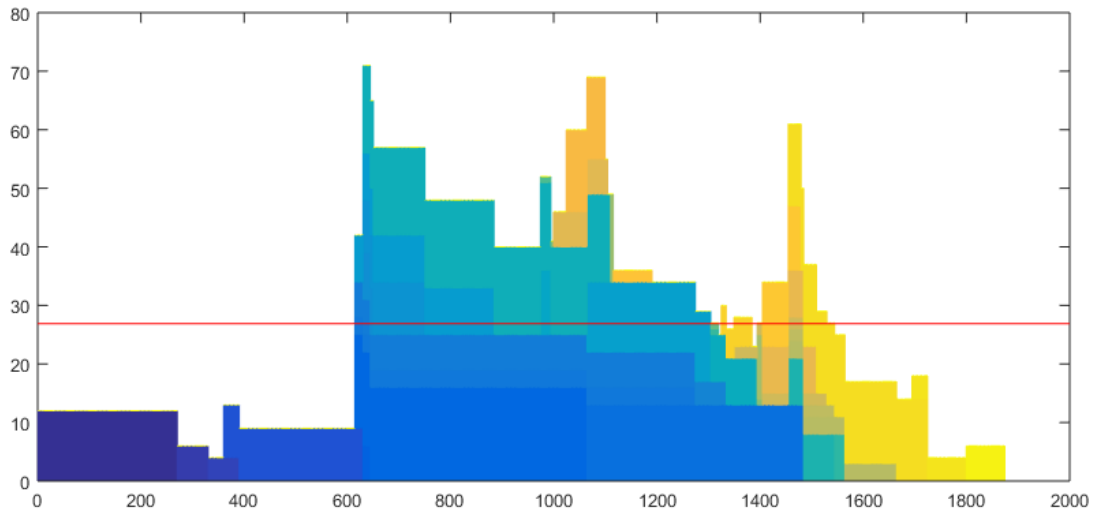
**Πίνακας 8:** Τελική μορφή δεδομένων προβλήματος

A/A	Dd	rr	P	FS	A/A	Dd	rr	P	FS
<b>1</b>	0	0	0	0	<b>21</b>	15	1	15	0
<b>2</b>	270	12	1	0	<b>22</b>	20	1	14	30
<b>3</b>	60	6	2	0	<b>23</b>	15	1	15	30
<b>4</b>	60	4	3	-30	<b>24</b>	5	1	16	0
<b>5</b>	270	9	4	0	<b>25</b>	10	1	17	0
<b>6</b>	14	6	5	-30	<b>26</b>	5	15	18	0
<b>7</b>	450	16	6	0	<b>27</b>	10	11	17	0
<b>8</b>	420	13	7	-30	<b>28</b>	210	3	8	-60
<b>9</b>	660	3	6	0	<b>29</b>	90	2	8	-60
<b>10</b>	660	6	6	0	<b>30</b>	180	2	23	0
<b>11</b>	60	4	10	-10	<b>31</b>	105	6	24	0
<b>12</b>	20	8	5	0	<b>32</b>	105	8	27	0
<b>13</b>	120	9	5	0	<b>33</b>	75	14	22	0
<b>14</b>	270	8	6	90	<b>34</b>	75	2	26	0
<b>15</b>	240	12	7	0	<b>35</b>	75	11	25	0
<b>16</b>	20	11	14	0	<b>36</b>	60	5	11	0
<b>17</b>	90	8	15	0	<b>37</b>	270	14	8	-30
<b>18</b>	480	15	5	0	<b>38</b>	105	4	37	0
<b>19</b>	90	8	8	0	<b>39</b>	75	6	38	0
<b>20</b>	20	8	19	0	<b>40</b>	0	0	39	0

Για την επίλυση εφαρμόστηκαν διαδοχικά η Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό (BEH) και στην συνέχεια το Υβριδικό Σχήμα (BEH-ΠΑ) όπου συνδυάζεται η BEH με την Προσομοιωμένη Ανόπτηση (ΠΑ). Τα πειράματα έτρεξαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab ενώ χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστές με Λειτουργικό Σύστημα Windows

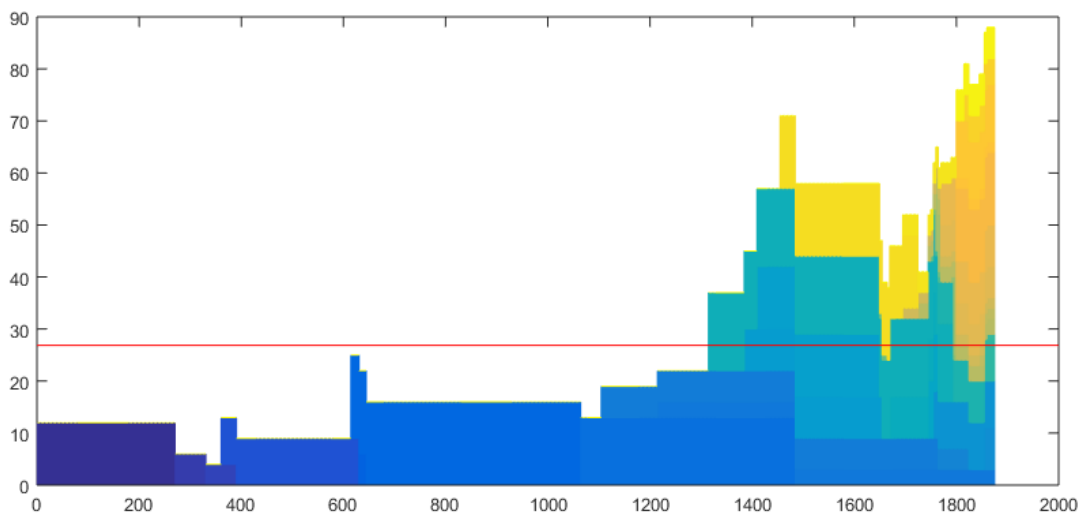
10 Pro με επεξεργαστές 3.6GHz Intel Core i7 και 3.6GHz Intel Core i7-9700KF με αντίστοιχες μνήμες RAM 4GB και 16GB.

**Εικόνα 3 :** Προφίλ Πόρων Νωρίτερης Έναρξης Δραστηριοτήτων (Εκατοστιαία Ημερήσια Χρήση)



Οι Ενωρίτεροι Χρόνοι Έναρξης (Early Start-ES) και οι Αργότεροι Χρόνοι Έναρξης (Late Start-LS) κάθε δραστηριότητας υπολογίστηκαν με την χρήση Matlab. Έγινε εισαγωγή των δεδομένων του Πίνακα 8 και επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων με το Πρόγραμμα Microsoft Project για τις δραστηριότητες που αποτελούν την Κρίσιμη Διαδρομή και τους Ενωρίτερους Χρόνους Έναρξης και Λήξης των δραστηριοτήτων.

**Εικόνα 4:** Προφίλ Πόρων Αργότερης Έναρξης Δραστηριοτήτων (Εκατοστιαία Ημερήσια Χρήση)



Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν τα προφίλ των πόρων που χρησιμοποιούνται όταν οι δραστηριότητες εκκινούν το νωρίτερο δυνατό (ES) και όταν εκκινούν το αργότερο δυνατό (LS), όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 3 και Εικόνα 4 αντίστοιχα.

Με την χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab έγινε αξιολόγηση των διανυσμάτων λύσεων ES και LS χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις αξιολόγησης λύσεων δηλαδή των συναρτήσεων: Gf, RLI, STD, STEP, R2, RIC και EV όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.

**Πίνακας 9.** Αξιολόγηση Λύσεων ES και LS

	<b>Gf</b>	<b>RLI</b>	<b>STD</b>	<b>STEP</b>	<b>R2</b>	<b>RIC</b>	<b>EV</b>
<b>ES</b>	71	30795	18,7687	330	2013033	3511876	-3,4228
<b>LS</b>	88	33689	21,1427	228	2174295	3511876	-3,4228

Πέντε διαφορετικά σετ παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Ο πληθυσμός ορίστηκε στους 50 αναζητητές (agents) ενώ έγιναν δοκιμές για επαναλήψεις (γενιές) πλήθους 10, 50 και 100. Η διαδικασία επαναλήφθηκε διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των γενιών στις 50 και δοκιμάζοντας τις τιμές 10, 50 και 100 στην παράμετρο του πληθυσμού.

Για κάθε σετ παραμέτρων εκτελέστηκαν 50 ανεξάρτητα πειράματα για κάθε περίπτωση και όλες οι υπόλοιπες παράμετροι των αλγορίθμων που συνιστούν το υβριδικό σχήμα παρέμειναν σταθερές σε όλα τα πειράματα και οι τιμές τους παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10**.

Στην πρώτη περίπτωση όπου εφαρμόστηκε η BEH, έγινε εφαρμογή του περιεχόμενου στην μέθοδο μηχανισμού επανατοποθέτησης των λύσεων που δεν βελτιώνουν τη θέση τους όπου κριτήριο επιλογής του τρόπου επανατοποθέτησης είναι το αν η ποιότητα του αναζητητή που επανατοποθετείται είναι μεγαλύτερη από τη μέση ποιότητα του πληθυσμού.

Στην δεύτερη περίπτωση, ο μηχανισμός επανατοποθέτησης αναζητητών βασίστηκε στο κριτήριο Metropolis (Metropolis Criterion) όπου η ποιότητα της λύσης του αναζητητή προσομοιώνεται από την εξέλιξη της παραμέτρου της θερμοκρασίας της ΠΑ (T), η οποία μειώνεται σταδιακά κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου.

**Πίνακας 10:** Τιμές των παραμέτρων της BEH και του Υβριδικού Σχήματος BEH-ΠΑ

<b>Παράμετρος</b>	<b>BEH</b>	<b>BEH-ΠΑ</b>
Συντελεστής Επανατοποθέτησης	0,08	0,08
Θερμοκρασία (T)	-	1000
Ρυθμός Μείωσης Θερμοκρασίας ( $r_T$ )	-	0,95

Στους Πίνακες 11 και 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για κάθε σετ παραμέτρων. Σε παρένθεση αναγράφεται το ζεύγος τιμών όπου ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στο μέγεθος του πληθυσμού ενώ ο δεύτερος αναφέρεται στις γενιές που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε σετ. Όπως εύκολα διακρίνεται, οι δύο μέθοδοι εξασφάλισαν καλύτερες λύσεις από τις μεθόδους της Νωρίτερης Έναρξης (Early Start) και της Αργότερης Έναρξης (Late Start).

**Πίνακας 11:** Αποτελέσματα ΒΕΗ και ΒΕΗ-ΠΑ για το κριτήριο RLI

	<b>Καλύτερο Προφίλ</b>	<b>Μέση Απόδοση</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>
Νωρίτερη Έναρξη (ES)	30795	-	-
Αργότερη Έναρξη (LS)	33689	-	-
ΒΕΗ (10-50)	20613	20848,68	110,616
ΒΕΗ (50-10)	20671	20972,60	138,341
ΒΕΗ (50-50)	20578	20749,02	80,9468
ΒΕΗ (50-100)	20483	20722,48	82,3938
ΒΕΗ (100-50)	20491	20690,76	79,0816
ΒΕΗ-ΠΑ (10-50)	20515	20788,38	104,813
ΒΕΗ-ΠΑ (50-10)	20708	20986,40	106,413
ΒΕΗ-ΠΑ (50-50)	20517	20694,38	82,8128
ΒΕΗ-ΠΑ (50-100)	20496	20673,12	91,8252
ΒΕΗ-ΠΑ (100-50)	20453	20667,82	89,4805

**Πίνακας 12:** Αποτελέσματα ΒΕΗ και ΒΕΗ-ΠΑ για το κριτήριο Gf

	<b>Καλύτερο Προφίλ</b>	<b>Μέση Απόδοση</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>
Νωρίτερη Έναρξη (ES)	71	-	-
Αργότερη Έναρξη (LS)	88	-	-
ΒΕΗ (10-50)	43	45,88	1,1250
ΒΕΗ (50-10)	45	46,88	0,9304
ΒΕΗ (50-50)	42	45,18	0,8412
ΒΕΗ (50-100)	44	44,96	0,5643
ΒΕΗ (100-50)	43	44,86	0,6003
ΒΕΗ-ΠΑ (10-50)	44	45,72	0,6645
ΒΕΗ-ΠΑ (50-10)	44	46,54	1,0042
ΒΕΗ-ΠΑ (50-50)	44	45,08	0,3371
ΒΕΗ-ΠΑ (50-100)	42	44,82	0,6226
ΒΕΗ-ΠΑ (100-50)	43	44,98	0,5474

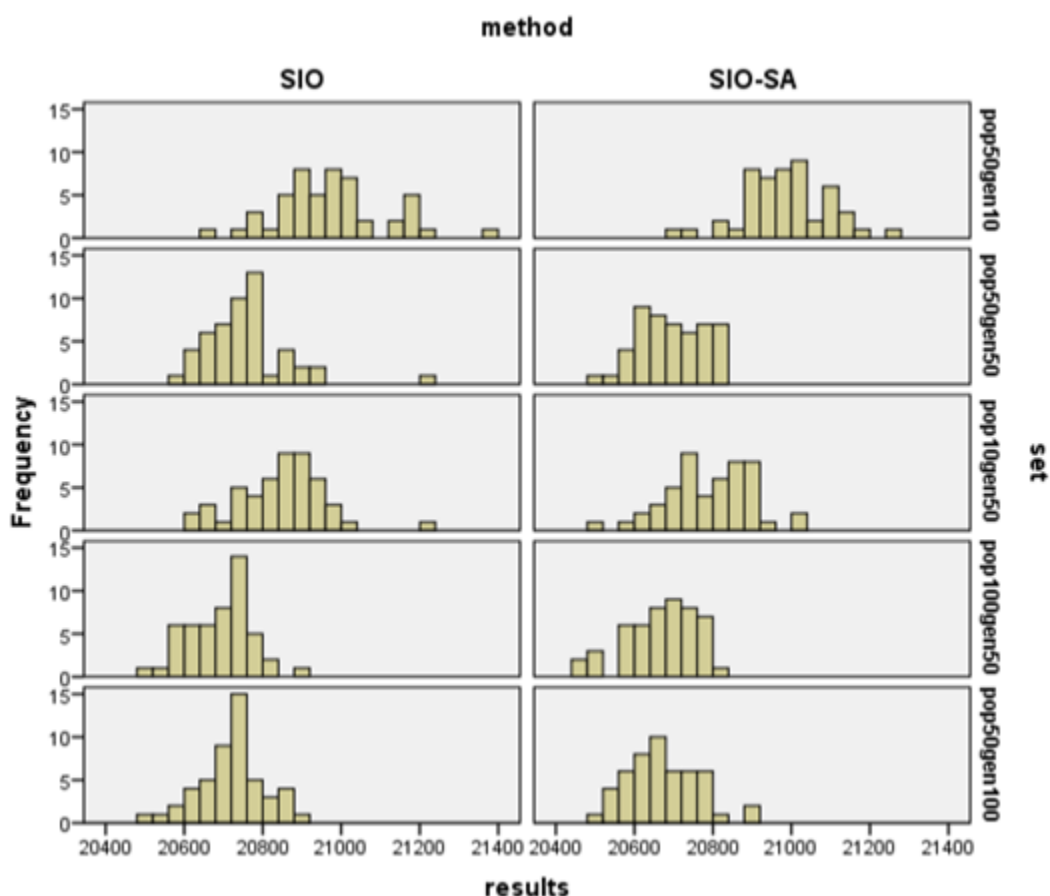
Παρατηρείται ότι όσον αφορά το κριτήριο RLI, η καλύτερη τιμή προέκυψε από την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό - Προσομοιωμένης Ανόπτωσης ίση με 20453 όταν οι αναζητητές ορίστηκαν στους 100 και εκτελέστηκαν 50 επαναλήψεις. Συγκρίνοντας με την τιμή RLI για την Νωρίτερη Έναρξη (30795) υπήρξε βελτίωση 33,58% ενώ η βελτίωση ανήλθε σε 39,29% σε σχέση με την τιμή



που καταγράφηκε από την εφαρμογή του κριτηρίου RLI στο προφίλ της Αργότερης Έναρξης (33689).

Παρόμοιας τάξης μεγέθους εξομάλυνση προέκυψε και από την εφαρμογή της απλής μεθόδου της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό με το κριτήριο RLI όπου η καλύτερη τιμή 20483 παρατηρήθηκε για αριθμό αναζητητών 50 και για 100 επαναλήψεις αντιστοιχώντας σε βελτίωση 33,49% για το προφίλ των νωρίτερων ενάρξεων και 39,20% για το προφίλ των αργότερων ενάρξεων.

Η γραφική αποτύπωση των κατανομών που προέκυψαν από την εφαρμογή της απλής μεθόδου BEH (SIO) και της υβριδικής μεθόδου BEH-ΠΑ (SIO-SA) παρατίθεται στα γραφήματα συγκριτικών κατανομών. Στο Γράφημα που ακολουθεί, συγκρίνεται η BEH (SIO) με την BEH-ΠΑ (SIO-SA) για τα ζεύγη παραμέτρων πληθυσμού (pop) και γενεών (gen) που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.

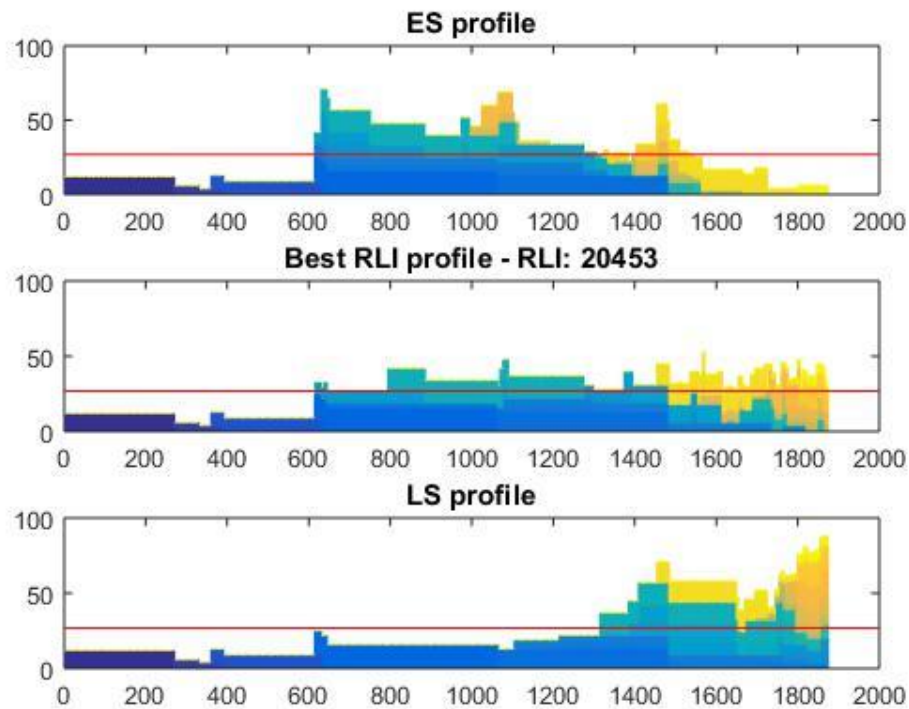


Εικόνα 5: Συγκριτικές κατανομές μεθόδου SIO και SIO-SA για το Κριτήριο RLI

Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται το προφίλ πόρων της καλύτερης λύσης, σύμφωνα με το κριτήριο RLI, κατά την εφαρμογή της μεθόδου του υβριδικού σχήματος (BEH-ΠΑ) με τιμές παραμέτρων: 100 αναζητητές και 50 επαναλήψεις. Η κόκκινη γραμμή σε κάθε προφίλ πόρων

αντικατοπτρίζει την μέση χρήση πόρων στο εν λόγω προφίλ. Συγκρίνοντας αυτό το προφίλ με τα αντίστοιχα προφίλ πόρων που δημιουργούνται όταν οι εργασίες εκκινούν το νωρίτερο δυνατό (Νωρίτερη Έναρξη-ES) και αντίστοιχα όταν εκκινούν το αργότερο δυνατό (Αργότερη Έναρξη-LS) είναι εμφανής η εξομάλυνση που επιτυγχάνεται στην περίπτωση της BEH-ΠΑ.

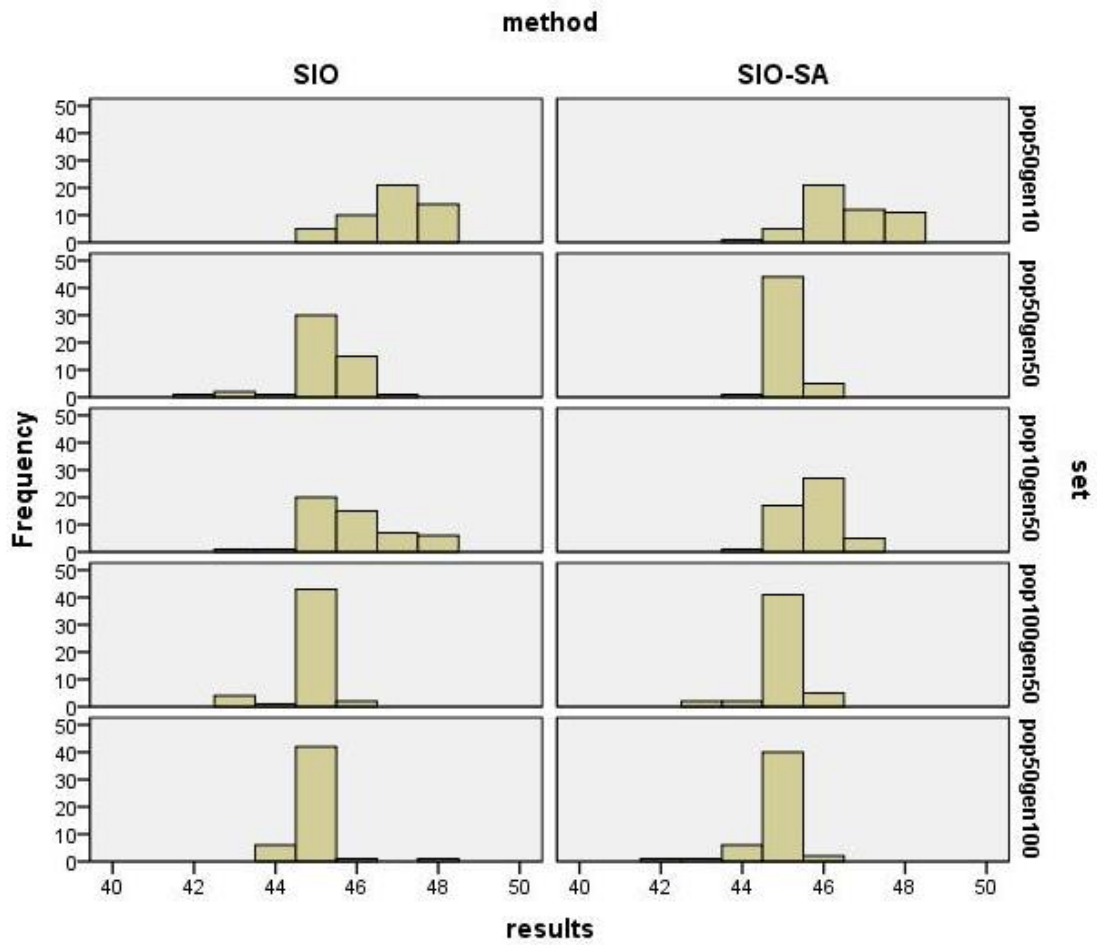
**Εικόνα 6:** Σύγκριση των Προφίλ Πόρων που δημιουργούνται από την Νωρίτερη Έναρξη (ES Profile), Αργότερη Έναρξη (LS Profile) και από την εφαρμογή της BEH-ΠΑ (100-50)



Για το κριτήριο Gf, η καλύτερη τιμή (42) επιτεύχθηκε τόσο κατά την εφαρμογή της μεθόδου της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό με αριθμό αναζητητών 50 και με αριθμό επαναλήψεων 50 όσο και από το υβριδικό σχήμα Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό – Προσομοιωμένης Ανόπτησης. Σε σχέση με την τιμή του Gf για το προφίλ πόρων που δημιουργούνται όταν οι εργασίες εκκινούν το νωρίτερο δυνατό (71) σημειώθηκε βελτίωση 40,85% ενώ για το προφίλ των αργότερων έναρξεων (88) η βελτίωση ήταν 52,27%.

Και οι δύο μέθοδοι που εφαρμόστηκαν εντόπισαν την ίδια βέλτιστη λύση αλλά με χρήση διαφορετικών ρυθμίσεων στις παραμέτρους πληθυσμού και γενεών. Όπως φαίνεται από το γράφημα Σύγκρισης **Gf ΥΣ**, η κατανομή των αποτελεσμάτων που έδωσαν τα 50 ανεξάρτητα πειράματα τα οποία έτρεξαν για κάθε διαφορετικό σετ παραμέτρων έχει πιο συμπαγή εικόνα στην περίπτωση της υβριδικής μεθόδου.

Εικόνα 7 : Συγκριτικές κατανομές μεθόδου SIO και SIO-SA για το Κριτήριο Gf



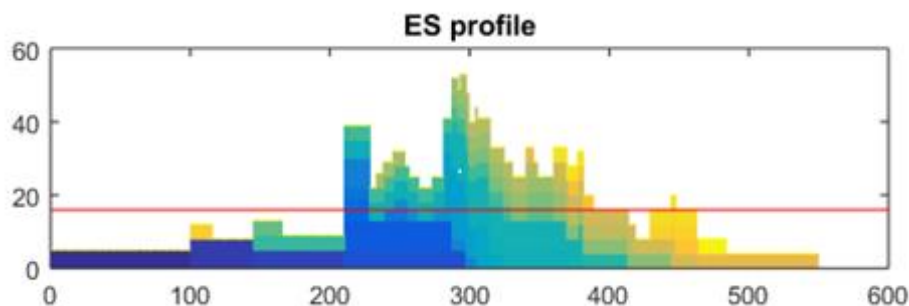
## 6.2 Ανάλυση Δεδομένων Έργου Κατασκευής Τερματικού Σταθμού

Αντίστοιχα, για το Έργο Κατασκευής Τερματικού Σταθμού, τα δεδομένα στην τελική μορφή τους προς επεξεργασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

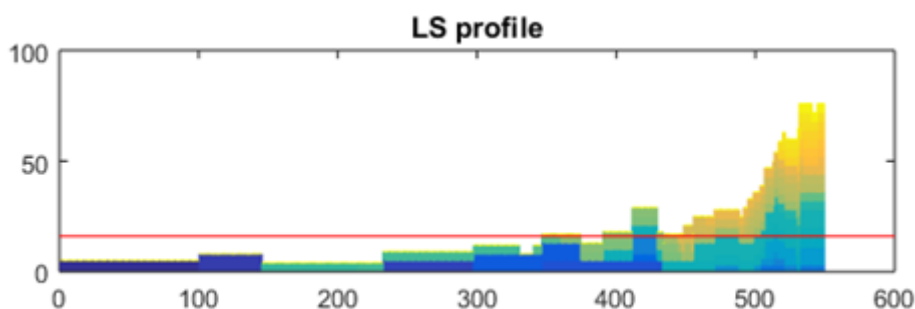
**Πίνακας 13:** Δεδομένα Εργασιών Κατασκευής Τερματικού Σταθμού: Τελική μορφή δεδομένων προβλήματος

AA	dd	rr	P	FS	AA	dd	rr	P	FS
1	0	0	0	0	23	116	4	22	10
2	100	5	1	0	24	20	4	23	0
3	45	8	2	0	25	20	4	3	0
4	65	5	3	0	26	73	4	6	0
5	87	5	4	80	27	84	4	24	0
6	77	8	4	0	28	84	4	6	0
7	18	3	4	-18	29	20	4	11	40
8	18	3	4	-18	30	55	4	29	0
9	18	3	7	10	31	58	4	24	0
10	18	3	9	0	32	87	4	26	-18
11	18	8	7	5	33	20	4	27	0
12	18	3	6	-60	34	85	4	33	0
13	18	3	12	10	35	5	4	23	0
14	18	3	13	-10	36	17	4	28	0
15	18	8	14	0	37	19	4	27	0
16	23	8	14	0	38	15	4	2	0
17	10	8	16	-10	39	33	4	32	0
18	20	4	16	0	40	33	4	32	0
19	159	5	4	0	41	21	4	26	9
20	94	8	6	0	42	19	4	33	0
21	36	4	5	0	43	0	0	35	0
22	69	4	3	0					

Δημιουργήθηκαν τα προφίλ των πόρων που χρησιμοποιούνται όταν οι δραστηριότητες εκκινούν το νωρίτερο δυνατόν (ES) και όταν εκκινούν το αργότερο δυνατό (LS), όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 7 και 8 αντίστοιχα.



**Εικόνα 8:** Προφίλ Πόρων Νωρίτερης Έναρξης Δραστηριοτήτων Κατασκευής Τερματικού Σταθμού



**Εικόνα 9:** Προφίλ Πόρων Αργότερης Έναρξης Δραστηριοτήτων Κατασκευής Τερματικού Σταθμού

Τα πειράματα έτρεξαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab 2015a ενώ χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστής με Λειτουργικό Σύστημα Windows 10 Pro, επεξεργαστή 3.6GHz Intel Core i7-9700KF και μνήμη RAM 16GB.

Με την χρήση Matlab, έγινε αξιολόγηση των διανυσμάτων λύσεων Νωρίτερης Έναρξης (ES) και Αργότερης Έναρξης (LS) χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις τις συναρτήσεις αξιολόγησης Gf και RLI όπως φαίνεται στον Πίνακα 13.

Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων και για την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό και του υβριδικού σχήματος Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό και Προσομοιωμένης Ανόπτησης, η πειραματική διαδικασία ακολούθησε τα βήματα που εκτελέστηκαν και στην περίπτωση του έργου Κατασκευής Υποσταθμού.

**Πίνακας 14:** Αξιολόγηση ES-LS ανά Κριτήριο

	<b>Κριτήριο Gf</b>	<b>Κριτήριο RLI</b>
ES	53	5659
LS	76	6323

Τόσο για την εκτέλεση της απλής μεθόδου όσο και της υβριδικής μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια σετ παραμέτρων με εκτέλεση 50 ανεξάρτητων πειραμάτων για κάθε σετ παραμέτρων σε πληθυσμό 50 αναζητητών με επαναλήψεις (γενιές) πλήθους 10, 50 και 100. Η διαδικασία επαναλήφθηκε διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των γενιών στις 50 και δοκιμάζοντας τις τιμές 10, 50 και 100 στην παράμετρο του πληθυσμού.

**Πίνακας 15:** Τιμές των παραμέτρων της BEH και του Υβριδικού Σχήματος BEH-ΠΑ

<b>Παράμετρος</b>	<b>BEH</b>	<b>BEH-ΠΑ</b>
Συντελεστής Επανατοποθέτησης	0,08	0,08
Θερμοκρασία (T)	-	1000
Ρυθμός Μείωσης Θερμοκρασίας ( $r_T$ )	-	0,95

Στον Πίνακα 16 και Πίνακα 17 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των δύο μεθόδων για τα πέντε σετ παραμέτρων ως προς την

αξιολόγηση των προφίλ πόρων με το κριτήριο RLI και με το κριτήριο Gf αντίστοιχα. Κάθε σετ παραμέτρων (μέγεθος αναζητητών – αριθμός επαναλήψεων) εμφανίζεται εντός παρένθεσης.

**Πίνακας 16:** Αποτελέσματα BEH και BEH-ΠΑ για το κριτήριο RLI

	<b>Καλύτερο Προφίλ</b>	<b>Μέση Απόδοση</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>
Νωρίτερη Έναρξη (ES)	5659	-	-
Αργότερη Έναρξη (LS)	6323	-	-
BEH (10-50)	3709	3783,8	72,3961
BEH (50-10)	3709	3842,6	127,4237
BEH (50-50)	3544	3688,0	106,2685
BEH (50-100)	3709	3787,0	70,3562
BEH (100-50)	3601	3686,0	50,5195
BEH-ΠΑ (10-50)	3681	3829,0	66,4329
BEH-ΠΑ (50-10)	3771	3864,5	73,0772
BEH-ΠΑ (50-50)	3558	3695,0	96,5013
BEH-ΠΑ (50-100)	3541	3678,0	102,1774
BEH-ΠΑ (100-50)	3515	3662,2	114,5084

**Πίνακας 17 :** Αποτελέσματα BEH και BEH-ΠΑ για το κριτήριο Gf

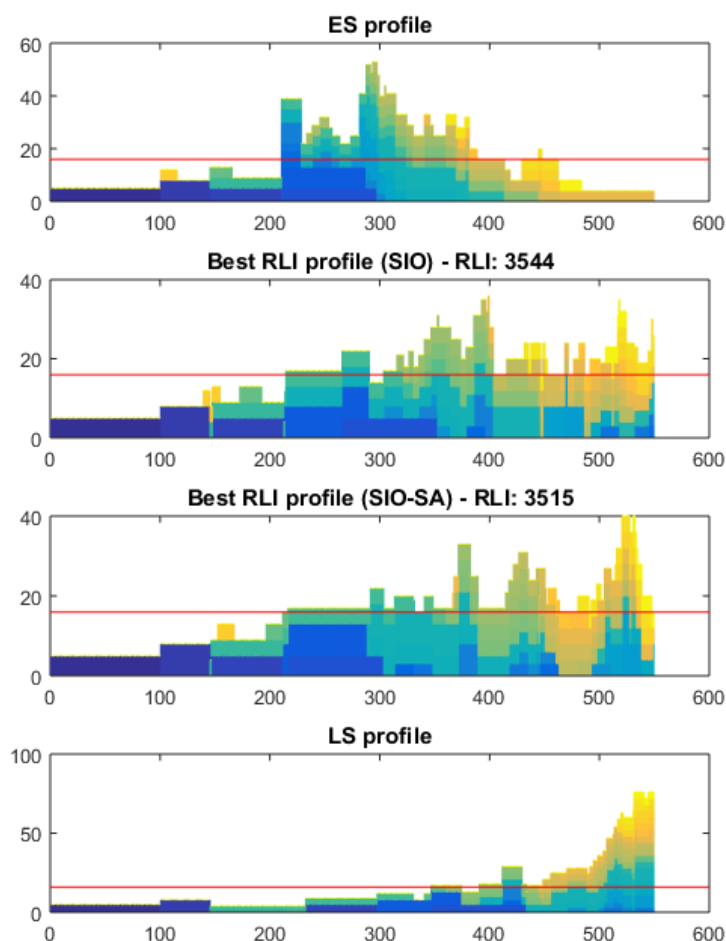
	<b>Καλύτερο Προφίλ</b>	<b>Μέση Απόδοση</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>
Νωρίτερη Έναρξη (ES)	53	-	-
Αργότερη Έναρξη (LS)	76	-	-
BEH (10-50)	28	31,70	1,1112
BEH (50-10)	31	32,64	0,8751
BEH (50-50)	28	30,64	1,1563
BEH (50-100)	27	30,00	1,5635
BEH (100-50)	28	30,10	1,1972
BEH-ΠΑ (10-50)	30	31,30	0,8233
BEH-ΠΑ (50-10)	32	32,80	0,7888
BEH-ΠΑ (50-50)	28	30,96	0,8071
BEH-ΠΑ (50-100)	28	30,40	1,5055
BEH-ΠΑ (100-50)	28	30,20	1,5492

Παρατηρείται ότι όσον αφορά το κριτήριο RLI, η καλύτερη τιμή προέκυψε από την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό - Προσομοιωμένης Ανόπτησης ίση με 3515 όταν οι αναζητητές ορίστηκαν στους 100 και εκτελέστηκαν 50 επαναλήψεις. Συγκρίνοντας με την τιμή RLI για την Νωρίτερη Έναρξη

(5659) υπήρξε βελτίωση 37,89% ενώ η βελτίωση ανήλθε σε 44,41% σε σχέση με την τιμή που καταγράφηκε από την εφαρμογή του κριτηρίου RLI στο προφίλ της Αργότερης Έναρξης (6323).

Παρόμοιας τάξης μεγέθους εξομάλυνση προέκυψε και από την εφαρμογή της απλής μεθόδου της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό με το κριτήριο RLI όπου η καλύτερη τιμή 3544 παρατηρήθηκε για αριθμό αναζητητών 50 και για 50 επαναλήψεις αντιστοιχώντας σε βελτίωση 37,37% για το προφίλ των νωρίτερων ενάρξεων και 43,95% για το προφίλ των αργότερων ενάρξεων.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των καλύτερων τιμών και για τις δύο μεθόδους σε σχέση με το προφίλ των νωρίτερων και αργότερων ενάρξεων ως προς το κριτήριο RLI οπτικοποιούνται στην Εικόνα 10. Με κόκκινη γραμμή σημειώνεται η μέση χρήση πόρων ανά προφίλ.

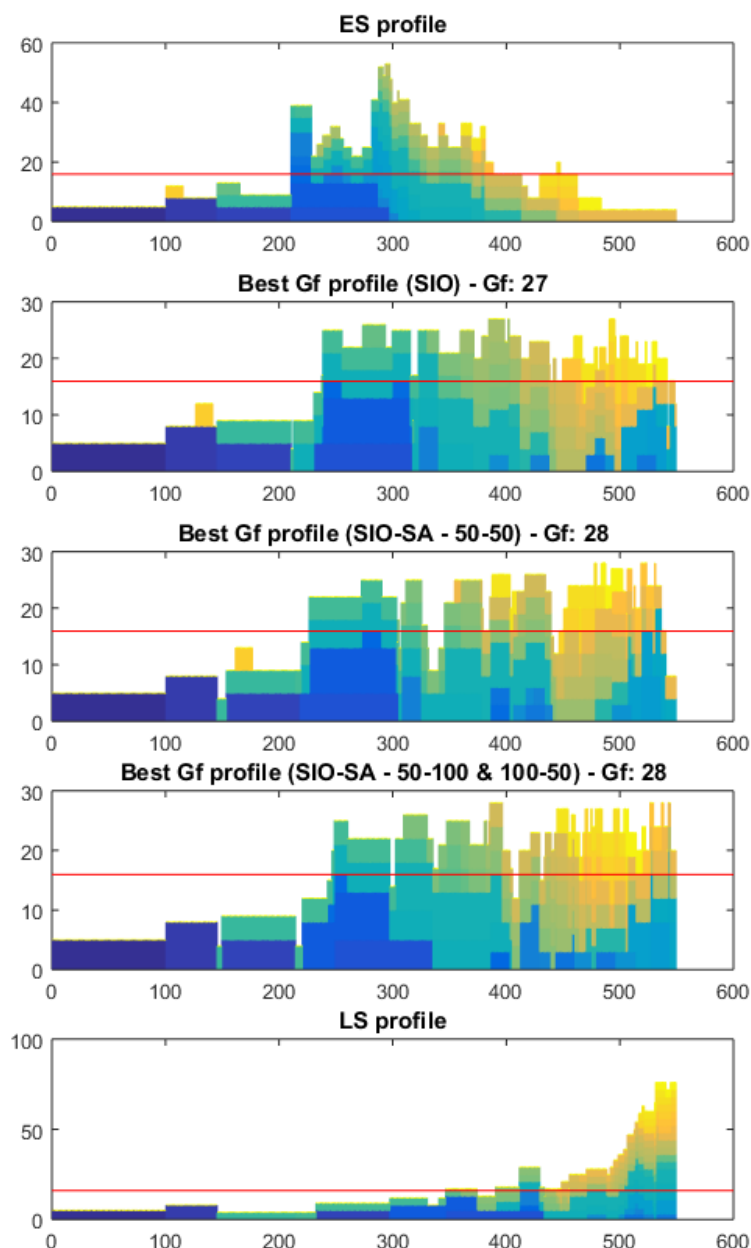


**Εικόνα 10:** Σύγκριση Καλύτερων Προφίλ βασισμένα στο RLI

Για το κριτήριο Gf, η καλύτερη τιμή επιτεύχθηκε κατά την εφαρμογή της απλής μεθόδου της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό ίση με 27 για αριθμό αναζητητών 50 και με αριθμό επαναλήψεων 100. Σε σχέση με την τιμή του Gf για το προφίλ πόρων που

δημιουργούνται όταν οι εργασίες εκκινούν το νωρίτερο δυνατό (53) σημειώθηκε βελτίωση 49,06% ενώ για το προφίλ των αργότερων ενάρξεων (76) η βελτίωση ήταν 64,74%.

Επιτυχής ήταν και η αντιμετώπιση του προβλήματος με την υβριδική μέθοδο όπου η τιμή 28 επιτεύχθηκε σε τρία από τα σεντ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα επιτεύχθηκε για τα σεντ 50 αναζητητών με 50 επαναλήψεις, 50 αναζητητών με 100 επαναλήψεις και 100 αναζητητών με 50 επαναλήψεις. Η βελτίωση σε σχέση με το προφίλ των νωρίτερων ενάρξεων είναι 47,16% και 63,16% για το προφίλ των αργότερων ενάρξεων.



**Εικόνα 11:** Σύγκρισης Καλύτερων Προφίλ βασισμένα στο Gf

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των καλύτερων τιμών και για τις δύο μεθόδους σε σχέση με το προφίλ των νωρίτερων και αργότερων ενάρξεων ως προς το κριτήριο Gf απεικονίζονται



στην Εικόνα **11** όπου με κόκκινη γραμμή σημειώνεται η μέση χρήση πόρων ανά προφίλ και παρουσιάζεται η σύγκριση του προφίλ της καλύτερης τιμής Gf (27) που επιτεύχθηκε με την χρήση της Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό όσο και η καλύτερη τιμή που επιτεύχθηκε για 3 σετ παραμέτρων με την χρήση της υβριδικής μεθόδου.

Μεσοσταθμικά για όλα τα σετ παραμέτρων και με κριτήριο το RLI η εφαρμογή και των δύο μεθόδων πέτυχε εξομάλυνση κατά 35,79% και 42,53% σε σχέση με τις τιμές των προφίλ νωρίτερης έναρξης και αργότερης έναρξης αντίστοιχα. Η μεσοσταθμική βελτίωση για το κριτήριο Gf ήταν 45,66% ως προς το προφίλ των νωρίτερων ενάρξεων και 62,11% για το προφίλ των αργότερων ενάρξεων.

## 7 Συμπεράσματα

Ο χώρος της ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε κομβικό σημείο την τρέχουσα περίοδο. Έως πρόσφατα, στην Ελλάδα υπήρχε μονοπώλιο στην παραγωγή ρεύματος αλλά περισσότερο στην μεταφορά και την διανομή του στον καταναλωτή. Τα έργα υποδομών ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζονταν και εκτελούνταν με βάση τα δεδομένα της εποχής και υπό τους περιορισμούς του ισχύοντος πλαισίου.

Ενώ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άρχισαν να εμφανίζονται και νέοι παίκτες την τελευταία εικοσαετία, τα τελευταία μόλις χρόνια υπήρξε ραγδαία αύξηση νέων παραγωγών οι οποίοι αιτούνται την σύνδεση τους στο δίκτυο μεταφοράς ώστε να διαθέσουν το παραγόμενο ρεύμα προς πώληση μέσω νέων υποσταθμών μετατροπής ρεύματος. Ως αποτέλεσμα της προώθησης της πράσινης ενέργειας από την Ευρωπαϊκή Ένωση, δημιουργήθηκαν ευνοϊκές συνθήκες για την επέκταση και αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς ώστε να μπορεί να διανεμηθεί η ισχύς των νέων σταθμών παραγωγής.

Ταυτόχρονα η ανάπτυξη των διεθνών διασυνδέσεων μεταξύ των ηλεκτρικών συστημάτων κρατών-μελών αλλά και τρίτων χωρών πρόσφερε περαιτέρω ώθηση στην ήδη σχεδιαζόμενη ηλεκτρική διασύνδεση των νησιών με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό δίκτυο μέσω υποβρυχίων καλωδίων και τερματικών σταθμών.

Τα έργα κατασκευής υποσταθμών υψηλής τάσης αλλά και τερματικών σταθμών υποβρυχίων διασυνδέσεων που είναι ήδη σε εξέλιξη αποτελούν μόνο ένα μικρό ποσοστό των σχεδιαζόμενων προς υλοποίηση τα επόμενα χρόνια τα οποία λόγω των νέων συνθηκών είναι κρίσιμης σημασίας ως προς την επίτευξη των στόχων της απολιγνιτοποίησης και θέτουν ισχυρές βάσεις για την θωράκιση του ενεργειακού συστήματος ενώ αποτελούν πρόσφορο επενδυτικό έδαφος που θα ενισχύσει την ανάπτυξη.

Εντούτοις, η εφαρμοζόμενη πρακτική στον τομέα κατασκευής των έργων ηλεκτρικής ενέργειας δεν ακολουθεί τις ραγδαίες εξελίξεις. Στο πεδίο του χρονοπρογραμματισμού αλλά και στην διαχείριση πόρων, χρησιμοποιούνται απλά εργαλεία και έτοιμες εμπορικές εκδόσεις λογισμικών διαχείρισης έργων τα οποία δεν ενσωματώνουν καινοτομία και νέες τεχνικές διαχείρισης. Αυτή η έλλειψη εφαρμογής νέων τεχνικών αποτέλεσε το κίνητρο έναρξης της ερευνητικής διαδικασίας στο πλαίσιο της οποίας συντάχθηκε και η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από δύο έργα, ένα κατασκευής Υποσταθμού Υψηλής Τάσης και ένα κατασκευής Τερματικού Σταθμού Υποβρύχιας Διασύνδεσης ώστε να διερευνηθεί το πιθανό περιθώριο βελτίωσης που μπορεί να επιτευχθεί στην εξομάλυνση πόρων

από την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων που έχουν αποδώσει ικανοποιητικά σε μικρά αλλά και μεσαία τεχνητά έργα.

Τα αποτελέσματα ήταν άκρως ενθαρρυντικά αφού σε σχέση με τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους Νωρίτερης Έναρξης και Αργότερης Έναρξης, που αποτελούν την κοινή προσέγγιση στον κατασκευαστικό κλάδο, η Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό προσέφερε εξομάλυνση της τάξης του 50% στα νέα προφίλ πόρων που δημιουργήθηκαν.

Η εφαρμογή του υβριδικού σχήματος στο οποίο συνδυάζεται η Βελτιστοποίηση Εμπνευσμένη από τον Ηχοεντοπισμό με την μέθοδο της Προσομοιωμένης Ανόπτησης απέδωσε εξίσου με την εφαρμογή της απλής μεθόδου και στα δύο πραγματικά έργα θέτοντας την βάση για την δυνατότητα αξιοποίησης των νέων τεχνικών στην διοίκηση πραγματικών έργων. Τα έργα που επιλέχθηκαν χρησιμεύουν ως βάση σύγκρισης, καθώς λόγω των αλλαγών που επιβάλλονται από την στροφή στην πράσινη ενέργεια, πρόκειται να κατασκευαστεί μεγάλος αριθμός νέων υποσταθμών αλλά και τερματικών σταθμών με παρόμοια χαρακτηριστικά και μέγεθος σε σχέση με τα έργα που αποτέλεσαν αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

## 8 Βιβλιογραφία

AL-Tabtabai, H. and Alex, A.P., 1999. Using genetic algorithms to solve optimization problems in construction. *Engineering Construction and Architectural Management*, 6(2), pp.121–132.

Anagnostopoulos, K.P. and Koulinas, G.K., 2010. A simulated annealing hyperheuristic for construction resource levelling. *Construction Management and Economics*, 28(2), pp.163–175.

Back, T., Fogel, D.B. and Michalewicz, Z., 1997. *Handbook of Evolutionary Computation. 1st ed.*

Benjaoran, V., Tabyang, W. and Sooksil, N., 2015. Precedence relationship options for the resource levelling problem using a genetic algorithm. *Construction Management and Economics*, 33(9), pp.711–723.

Bozorg Haddad, O., Mirmomeni, M., Zarezadeh Mehrizi, M. and Mariño, M.A., 2010. Finding the shortest path with honey-bee mating optimization algorithm in project management problems with constrained/unconstrained resources. *Computational Optimization and Applications*, 47(1), pp.97–128.

Burke, R., 1999. *Project Management, Planning & Control Techniques*.

D. Pythaloka, A. T. Wibowo and M. D. Sulistiyo, 2015. Artificial fish swarm algorithm for job shop scheduling problem. In: *2015 3rd International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*. 2015 3rd International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT). pp.437–443.

Dunham, D.F., 2015. Robustness of genetic algorithm solutions in resource leveling. In: *2015 Systems and Information Engineering Design Symposium*. 2015 Systems and Information Engineering Design Symposium. pp.267–272.

Eberhart, R. and Kennedy, J., 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In: *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*.

El-Gafy, M., 2007. Resource Allocation for Repetitive Construction Schedules: An Ant Colony Optimization Approach. In: *Proceedings of the ASC 43rd Annual International Conference, Flagstaff, Arizona*. [online] ASC 43rd Annual International Conference. . Available at: <[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30726741/CERT103002007.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DResource\\_Allocation\\_for\\_Repetitive\\_Const.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191003%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20191003T160225Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=db8e3058cf84a35af26a246db4dc198b22dc5d6e0c64c379cb53980d591b4135](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30726741/CERT103002007.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DResource_Allocation_for_Repetitive_Const.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191003%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20191003T160225Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=db8e3058cf84a35af26a246db4dc198b22dc5d6e0c64c379cb53980d591b4135)>.

Fathi, H. and Afshar, A., 2008. Multiple Resource Constraint Time-Cost-Resource Optimization Using Genetic Algorithm.

Fister, J., Yang, X.-S., Fister, I., Brest, J. and Fister, D., 2013. A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization. [online] Available at: <<http://arxiv.org/abs/1307.4186>>.

Gaitanidis, A., Vassiliadis, V., Kyriklidis, C. and Dounias, G., 2016. Hybrid Evolutionary Algorithms in Resource Leveling Optimization: Application in a Large Real Construction Project of a 50000 DWT Ship. In: *Proceedings of the 9th Hellenic Conference on Artificial Intelligence*, SETN '16. [online] New York, NY, USA: ACM.p.25:1–25:8. Available at: <<http://doi.acm.org/10.1145/2903220.2903227>>.

Garmsiri, M. and Abassi, M.R., 2012. Resource leveling scheduling by an ant colony-based model. *Journal of Industrial Engineering International*, 8(1), p.7.

Ghoddousi, P., Eshtehardian, E., Jooybanpour, S. and Javanmardi, A., 2013. Multi-mode resource-constrained discrete time–cost–resource optimization in project scheduling using non-dominated sorting genetic algorithm. *Automation in Construction*, 30, pp.216–227.

Guo, Y., Li, N., Zhang, H. and Ye, T., 2012. Elitist vector evaluated particle swarm optimization for multi-mode resource leveling problems. *Journal of Computational Information Systems*, 8(9), pp.3697–3705.

Holland, J.H., 1992b. Genetic algorithms Scientific american,.

Huang, H.-H., Huang, C.-H. and Pei, W., 2015. Solving Multi-Resource Constrained Project Scheduling Problem using Ant Colony Optimization. *Journal of Engineering*, p.11.

Iranagh, M.A. and Sonmez, R., 2012. A GENETIC ALGORITHM FOR RESOURCE LEVELING OF CONSTRUCTION PROJECTS.

Kaiafa, S. and Chassiakos, A.P., 2015. A Genetic Algorithm for Optimal Resource-driven Project Scheduling. *Selected papers from Creative Construction Conference 2015*, 123, pp.260–267.

Kim, J.-L., 2013. Genetic algorithm stopping criteria for optimization of construction resource scheduling problems. *Construction Management and Economics*, 31(1), pp.3–19.

Kim, K.W., Gen, M. and Yamazaki, G., 2003. Hybrid genetic algorithm with fuzzy logic for resource-constrained project scheduling. *Soft Computing in Manufacturing Enterprise Systems*, 2(3), pp.174–188.

Kirikpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P., 1983. Optimization by Simulated Annealing. Science,.

Koulinas, G., Kotsikas, L. and Anagnostopoulos, K., 2014. A particle swarm optimization based hyper-heuristic algorithm for the classic resource constrained project scheduling problem. *Information Sciences*, 277, pp.680–693.

Koza, Jr., 1992. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection. *MIT press*.

Kyriklidis, 2015. Διατριβή: Νοήμονες μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων εξομάλυνσης πόρων σε έργα - Κωδικός: 42879. [online] Available at: <<http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/42879#page/1/mode/2up>> [Accessed 6 Oct. 2019].

Kyriklidis, C. and Dounias, G., 2014. Application of Evolutionary Algorithms in Project Management. In: L. Iliadis, I. Maglogiannis and H. Papadopoulos, eds. *Artificial Intelligence Applications and Innovations*. Springer Berlin Heidelberg.pp.335–343.

Kyriklidis, C. and Dounias, G., 2016. Evolutionary computation for resource leveling optimization in project management. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 23(2), pp.173–184.

Leu, S.-S. and Yang, C.-H., 1999. A genetic-algorithm-based resource-constrained construction scheduling system. *Construction Management and Economics*, 17(6), pp.767–776.

Li, Z., Wuliang, P. and Zhongliang, Z., 2010. An Ant Colony System for Solving Resource Leveling Problem. In: *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. pp.489–492.

N. Pang, Y. Shi and Y. You, 2008. Resource Leveling Optimization of Network Schedule Based on Particle Swarm Optimization with Constriction Factor. In: *2008 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*. 2008 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. pp.652–656.

Ponz-Tienda, J.L., Salcedo-Bernal, A., Pellicer, E. and Benlloch-Marco, J., 2017. Improved adaptive harmony search algorithm for the resource leveling problem with minimal lags. *Automation in Construction*, 77, pp.82–92.

Ponz-Tienda, J.L., Yepes, V., Pellicer, E. and Moreno-Flores, J., 2013. The Resource Leveling Problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm. *Automation in Construction*, 29, pp.161–172.

Prayogo, D., Cheng, M.-Y., Wong, F.T., Tjandra, D. and Tran, D.-H., 2018. Optimization model for construction project resource leveling using a novel modified symbiotic organisms search. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19, pp.625–638.

Prayogo, D. and Kusuma, C.T., 2019. Optimization of resource leveling problem under multiple objective criteria using a symbiotic organisms search. *Civil Engineering Dimension*, 21(1), pp.43–49.

Priyanto, A.A., Adiwijaya and Maharani, W., 2008. IMPLEMENTATION OF ANT COLONY OPTIMIZATION ALGORITHM ON THE PROJECT RESOURCE SCHEDULING PROBLEM.

Tzanetos, A., Kyriklidis, C., Papamichail, A., Dimoulakis, A. and Dounias, G., 2018. A Nature Inspired Metaheuristic for Optimal Leveling of Resources in Project Management. In: *Proceedings of the 10th Hellenic Conference on Artificial Intelligence*, SETN '18. [online] New York, NY, USA: ACM.p.17:1–17:7. Available at: <<http://doi.acm.org/10.1145/3200947.3201014>>.

W. Tian and Y. Tian, 2009. An Improved Artificial Fish Swarm Algorithm for Resource Leveling. In: *2009 International Conference on Management and Service Science*. 2009 International Conference on Management and Service Science. pp.1–4.

Wenmin Han and Binbin Zhu, 2017. Research on New Methods of Multi-project Based on Entropy and Particle Swarm Optimization for Resource Leveling Problem. In: *2017 2nd International Symposium on Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (ISAECE 2017)*. [online] Atlantis Press. Available at: <<https://doi.org/10.2991/isaece-17.2017.40>>.

Yan Liu, Sheng-Li Zhao, Xi-Kai Du and Shu-Quan Li, 2005. Optimization of resource allocation in construction using genetic algorithms. In: *2005 International Conference on*

*Machine Learning and Cybernetics*. 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. pp.3428-3432 Vol. 6.

Zhang, H., Li, X., Li, H. and Huang, F., 2005. Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling. *Automation in Construction*, 14(3), pp.393–404.

ΑΔΜΗΕ ΑΕ, 2018. ΔΕΚΑΕΤΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 2018-2027. Available at: <[http://www.admie.gr/fileadmin/user\\_upload/Files/masm/2018\\_2027/DPA\\_2018\\_2027.pdf](http://www.admie.gr/fileadmin/user_upload/Files/masm/2018_2027/DPA_2018_2027.pdf)>.

ΑΔΜΗΕ ΑΕ, 2019. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ. Available at: <<http://www.admie.gr/to-systima-metaforas/dedomena-stoicheia-systimatos/perigrafi-systimatos-metaforas/>>.

Τζανέτος, Αλέξανδρος, 2020. *Νοήμονες υπολογιστικές μέθοδοι εμπνευσμένες από τον φυσικό κόσμο για την βελτιστοποίηση συστημάτων: βελτιστοποίηση εμπνευσμένη από τον ηχοεντοπισμό*. [online] Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης. Available at: <<http://hdl.handle.net/10442/hedi/47419>>.

## Παράρτημα

Στο Παράρτημα Α παρατίθενται (σε Matlab) οι κώδικες της μεθόδου Βελτιστοποίησης Εμπνευσμένης από τον Ηχοεντοπισμό που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των πραγματικών προβλημάτων.

---

<b>Κώδικας</b>	<b>Σελ.</b>
A.1 Sonar Inspired Optimization (main code)	73
A.2 Συνάρτηση υπολογισμού αντικειμενικής συνάρτησης - eval_criteria	78
A.3 Συνάρτηση Υπολογισμού Νωρίτερης και Αργότερης Έναρξης - early_late_start_FS	80
A.4 Συνάρτηση ελέγχου πλήρους σάρωσης	81
A.5 Συνάρτηση επανυπολογισμού παραμέτρων μετά την επανατοποθέτηση των λύσεων	82

---



**A.1 Sonar Inspired Optimization (main code)**

```

%-----%
%-----%
%               SONAR INSPIRED OPTIMIZATION
%
%       This code deals with a Project Management Problem, namely
%
%               the Resource Levelling Problem.
%
%
%
% Data is given in the form of 3 matrices:
%
% - dd (tasks' durations)
%
% - rr (tasks' resources) and
%
% - P  (each task's prerequisites tasks)
%
%
% in some cases, one more vector is needed:
%
% - FS (the days before the finish of the prerequisite's task that
are      %
%       needed to start the current task)
%
%
%
%
% by:           Alexandros Tzanetos  © 2017
%
% edited by:    Alexandros Tzanetos  © 2019
%
%-----%
%-----%

%% Initialization
dimensions = size(dd,1);
% prompt = 'How many tasks/activities this problem has? ';
% dimensions = input(prompt);
criteria = 8;
% prompt = 'Based on how many criteria do you want this problem to be
solved? ';
% criteria = input(prompt);
cr = 2;
% prompt = 'Based on which criterion do you want this problem to be
solved? ';
% cr = input(prompt);
ObjectiveFunction =
{'G_f', 'RLI', 'STD', 'STEP', 'R2', 'RIC', 'EV', 'Time'};
[bounds,accept_range] = early_late_start_FS(dd,P,FS);
finish_to_start = FS';

% Parameters of physical analogue
%----- IMPORTANT PARAMETERS -----
%-----%
fleet = 50; % number of ships - agents
scans = 10; % iterations - stopping criteria
checkpoint = scans*0.08;
angleidx = [50 40 30 20 10 5];

```

```

%-----%
intensity = ones(fleet,dimensions); % IMPORTANT PARAMETER -
Strictness factor
WA = zeros(fleet,1);
Pe = zeros(fleet,1);
I0 = 10^(-12); % reference sound intensity
durations = dd';
converg = 1; % rare, but happens ...
r0div = 1;

full_scan = 0;

% Matrices
x = zeros(fleet,dimensions);
fit_x = zeros(fleet,criteria);
r0 = zeros(fleet,dimensions);
r = zeros(fleet,dimensions);
movements = zeros(1,dimensions);
area = zeros(1,dimensions);
scan_best = Inf(fleet,1);
tracer = zeros(scans,1);
check = zeros(fleet,1);

for i=1:fleet
    % Initial Solutions
    for d=1:dimensions
        % Find if the current task has prerequisites
        k = find( P(d,:) );
        if isempty(k)==1
            x(i,d) = round(bounds(1,d) + (bounds(2,d) -
bounds(1,d))*rand);
        else
            tempBound = max( x(i,P(d,k)) + durations(1,P(d,k)) +
finish_to_start(1,P(d,k)) );
            x(i,d) = round(tempBound + (bounds(2,d) -
tempBound)*rand);
        end
    end
    % Initialize radius' matrix
    r0(i,:) = round( (bounds(2,:) - bounds(1,:)) ./4 );
    % Evaluation of solutions
    fit_x(i,:) = eval_criteria(x(i,:),x(i,end),dimensions,dd,rr);
    % Acoustic Power output (WA)
    Pe(i,1) = fit_x(i,cr);
    WA(i,1) = exp(Pe(i,1));
    % Initial intensity
    area(1,:) = 4 * pi * (r0(i,:).^2);
    intensity(i,:) = (WA(i,1) ./ area(1,:)) ;
    intensity(i,:) = 10 * log10(intensity(i,:) ./ I0);
end
targets = x; % Matrix with the best solution's coordinates found by
each ship
[best,I] = min(fit_x(:,cr));
best_solution = targets(I,:);
r0_best = r0(I,:);

%% Sonar scanning

scan = 1;

```

```

while scan <= scans
    fit = zeros(fleet,criteria);
    for i=1:fleet
%% Diversification: when no better found for some time, change the
solution
        if check(i,1) == checkpoint && fit_x(i,1) > mean(fit_x(:,1))
            for d=1:dimensions
                k = find( P(d,:) );
                if isempty(k)==1
                    x(i,d) = round(bounds(1,d) + (bounds(2,d) -
bounds(1,d))*rand);
                else
                    tempBound = max( x(i,P(d,k)) +
durations(1,P(d,k)) + finish_to_start(1,P(d,k)) );
                    x(i,d) = round(tempBound + (bounds(2,d) -
tempBound)*rand);
                end
            end
            r0(i,:) = (bounds(2,:) - bounds(1,:)) ./ r0div;
            [fit(i,:), Pe(i,1), WA(i,1), intensity(i,)] =
params_recalc(x(i,:),I0,r0(i,:),dd,rr);
            check(i,1) = 0;
        elseif check(i,1) == checkpoint
            r0(i,:) = r0_best(1,:) .*rand;
            x(i,:) = targets(I,:) + cos( r0(i,:) * pi);
            % Correction of solution
            k1 = find( x(i,:) < bounds(1,:) | x(i,:) > bounds(2,:) );
            x(i,k1) = bounds(1,k1) + ( bounds(2,k1) - bounds(1,k1) )
.* cos(x(i,k1)).^2;
            [fit(i,:), Pe(i,1), WA(i,1), intensity(i,)] =
params_recalc(x(i,:),I0,r0(i,:),dd,rr);
            check(i,1) = 0;
        end
%% -----
--- %%
        % Correction of effective radius r0
        k = find( r0(i,:) > accept_range(1,:) );
        r0(i,k) = rand .* accept_range(1,k);
        % Initialization of angles
        [~,idx] = sort(fit_x(:,1));
        k2 = find( idx == i );
        max_angle = angleidx(1, fix(k2 / (fleet/ (size(angleidx,2)-1)
) ) + 1);
        angles = fix(max_angle.*rand(1,dimensions));
%% ----- Full Scan Loop -----
--- %%
        full_scan = 0;
        while full_scan == 0
            % Rotation in every dimension
            r(i,:) = r0(i,:) .* rand;
            movements(1,:) = r(1,:) .* cos(angles(1,:));
            movements(1,:) = round( movements(1,:) );
            x(i,:) = movements(1,:) + x(i,:);
            angles(1,:) = angles(1,:) + fix(rand * max_angle);
            for d=1:dimensions
                k = find( P(d,:) );
                if isempty(k)==0
                    tempBound = max( x(i,P(d,k)) +
durations(1,P(d,k)) + finish_to_start(1,P(d,k)) );
                    % Correction of out-of-bounds values

```

```

        if x(i,d) < tempBound || x(i,d) > bounds(2,d)
            x(i,d) = tempBound + ( bounds(2,d) -
tempBound ) * cos(x(i,d))^2;
        end
        else
            if x(i,d) < bounds(1,d) || x(i,d) > bounds(2,d)
                x(i,d) = bounds(1,d) + ( bounds(2,d) -
bounds(1,d) ) * cos(x(i,d))^2;
            end
        end
    end
    % Check for scanning completion
    full_scan = check_for_scan(angles);

    x(i,:) = round( x(i,:) );
    fit(i,:) =
eval_criteria(x(i,:),x(i,end),dimensions,dd,rr);
    % Update best so far solution
    if fit(i,cr) < scan_best(i)
        scan_best(i) = fit(i,cr);
        sol = x(i,:);
    end
end
end
% -----
---- %
    %% Update Best Solution found by ship
    magnitude = ( scan_best(i) - best ) + 0.0008;
    if scan_best(i) < fit_x(i,cr)
        fit_x(i,cr) = scan_best(i);
        targets(i,:) = sol;
        check(i,1) = 0;
    else
        check(i,1) = check(i,1) +1;
    end
    % Intensity update
    intensity(i,:) = intensity(i,:) .* exp(magnitude);
    intensity(i,:) = 10 * log(intensity(i,:) ./ I0);
    % Acoustic Power output (WA) update
    Pe(i,1) = fit_x(i,cr);
    WA(i,1) = exp(Pe(i,1));
end
% Update Global Best Solution
[best,I] = min(fit_x(:,cr));
best_solution = targets(I,:);
tracer(scan,1) = best;
if scan ~= 1
    if tracer(scan-1,1) ~= tracer(scan,1)
        converg = scan;
    end
end
end

clc
fprintf('----- RESULTS -----
--\n')
fprintf('The project is optimized based on %s criterion.
\n',ObjectiveFunction{1,cr})
fprintf('Evaluations      : %d \n',scans*fleet)
fprintf('Checkpoint value    : %d \n',checkpoint)
fprintf('Currently at the     : %d scan \n',scan)
fprintf('Current best        : %d \n',best)

```

```
        disp('-----');  
-----');  
  
        scan = scan + 1;  
end
```

**A.2 Συνάρτηση υπολογισμού αντικειμενικής συνάρτησης - eval\_criteria**

```
% This function evaluates the solutions of the main code of SIO for
% resource levelling. All criteria are based on Ch. Kiriklides work.
```

```
function [evaluation] =
eval_criteria(x,maxTime,tasks,durations,resources)

durations = durations';
resources = resources';
% Finishing time of each task
finish = x + durations;

R = zeros(maxTime,tasks);
F = zeros(maxTime,1);
rd = zeros(1,tasks);
% Calculating  $\sum r_i \cdot d_i$ 
rd(1,:) = resources(1,:) .* durations(1,:);
% for task = 1:tasks
%     % Calculating  $\sum r_i \cdot d_i$ 
%     rd(1,task) = resources(1,task) * durations(1,task);
% end
rli = zeros(maxTime,1);
r2 = zeros(maxTime,1);
average_use = sum(rd) / maxTime;
average_use = round(average_use);

%% G_f criterion
for t = 1:maxTime
    for task = 1:tasks
        if x(1,task) <= t && finish(1,task) > t
            R(t,task) = R(t,task) + resources(1,task);
        end
    end
    F(t,1) = sum( R(t,:) );
    % for RLI criterion
    rli(t,1) = F(t,1) - average_use;
end
G_f = max(F);

%% RLI criterion
rli_1 = abs(rli);
RLI = sum(rli_1);

%% STD criterion
rli_2 = sum(rli.^2);
STD = sqrt( (rli_2)/(maxTime-1) );

%% STEP criterion
STEP = 0;
for t = 2:maxTime
    step = abs( F(t,1) - F(t-1,1) );
    STEP = STEP + step;
end

%% R^2 criterion
R2 = 0;
for t = 1:maxTime
    r2(t,1) = ( sum(R(t,:)) )^2;
    R2 = R2 + r2(t,1);
end
```

```
end

%% RIC criterion
RIC = 0;
for t = 1:maxTime
    ric = (maxTime * r2(t,1) ) / ( F(t,1) )^2;
    RIC = RIC + ric;
end

%% EV criterion
EV = 0;
for task = 2:tasks-1
    % first task is always START and has 0 resources
    % last task is always END and also has 0 resources
    % To avoid these and all tasks with 0 resources:
    if resources(1,task)~= 0
        rscs = resources(1,task) / sum(resources);
        ev = rscs * log(rscs);
        EV = EV + ev;
    end
end

%% t criterion
Time = maxTime;

%% OUTRUT
evaluation = [G_f RLI STD STEP R2 RIC EV Time];
```

**A.3 Συνάρτηση Υπολογισμού Νωρίτερης και Αργότερης Έναρξης –****early\_late\_start\_FS**

```

%% Calculation of Early and Late Start
% by: V. Vassiliades, Ch. Kiriklides

% This code calculates the Early and Late Start of each activity
% In this version (_FS), the calculation of either ES and LS is done
based
% also on Finish-to-Start relation of activities.
function [A,range] = early_late_start_FS(d,R,FS)

m=length(d); % number of activities
k=zeros(m);
index=find(sum(R,2)~=0); % non-zero rows
z=[];
v=z;
ES(1)=1;
for i=1:length(index)
    indexa=nonzeros(R(index(i),:));
    k(index(i),indexa)=ones(1,length(indexa));
    % Previous activities
    z=[z;ones(length(indexa),1)*index(i)
R(index(i),ismember(R(index(i),:),indexa))']];
    % Next activities
    v=[v;R(index(i),ismember(R(index(i),:),indexa))'
ones(length(indexa),1)*index(i)];
    tempc=ES(indexa)+d(indexa)'+ FS(indexa)';
    ES(i+1)=max(tempc);
end

[i,j]=sort(v(:,1));
% Following activities
v=[i v(j,2)];

LS=zeros(size(ES));
LS(end)=ES(end);
for i=length(index):-1:1
    LS(i)=min(LS(v(find(v(:,1)==i),2))- d(i) - FS(i) );
end

ES(end)=ES(end)-1;
LS(end)=LS(end)-1;
A = [ES;LS];
range = LS - ES;

```



#### **A.4 Συνάρτηση ελέγχου πλήρους σάρωσης**

```
function [feedback] = check_for_scan(angles)

feedback = 0;
if any(angles(1,:) > 360)
    feedback = 1;
end

end
```

## A.5 Συνάρτηση επανυπολογισμού παραμέτρων μετά την επανατοποθέτηση των λύσεων

```
function [fit_x, Pe, WA, intensity] = params_recalc(x,I0,r0,dd,rr)
% function [fit_x] = params_recalc(x,r0)
pwr = 0;

%% Evaluation of solutions
fit_x(1,:) = eval_criteria(x,x(1,end),size(x,2),dd,rr);

%% Acoustic Power output (WA)
Pe(1,1) = 10^(-pwr) * fit_x(1,1);
WA(1,1) = exp(Pe(1,1));

%% Initial intensity
area(1,:) = 4 * pi * (r0.^2);
intensity(1,:) = (WA(1,1) ./ area(1,:)) ;
intensity(1,:) = 10 * reallog(intensity(1,:) ./ I0);
```