



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Βελτιστοποίηση προγραμματισμού άντλησης φυσικού
αερίου από πολλαπλά πηγάδια με χρήση εξελικτικού
αλγορίθμου”**

Κάννας Σωτήριος

Επιβλέπων καθηγητής: Αθανάσιος Τόλης

ΑΘΗΝΑ, 2017

Ευχαριστήριο σημείωμα

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Α. Τόλη για την ανάθεση του θέματος, την αμεσότητα της συνεργασίας μας και την άψογη καθοδήγηση που μου παρείχε.

Έποψη

Στόχος της παρούσας μελέτης αποτελεί η βελτιστοποίηση του προγραμματισμού παραγωγής σε δεξαμενή φυσικού αερίου που αντλείται από πολλαπλά πηγάδια. Η αναζήτηση του βέλτιστου μείγματος ροής φυσικού αερίου μέσω των διαθέσιμων πηγαδιών είναι μείζονος σημασίας για τους διαχειριστές της δεξαμενής προκειμένου να αποκομίσουν το μέγιστο δυνατό κέρδος.

Χρησιμοποιείται μοντέλο βελτιστοποίησης που περιγράφει το φαινόμενο, το οποίο επιλύεται με χρήση του περιβάλλοντος της Matlab και συγκεκριμένα μέσω της συνάρτησης γενετικού αλγορίθμου ga. Δημιουργείται σενάριο προς μελέτη, υποθετικής δεξαμενής φυσικού αερίου που αντλείται από 5 πηγάδια και εξετάζεται ο μηνιαίος προγραμματισμός παραγωγής της. Το μοντέλο δοκιμάζεται για διαφορετικούς συνδυασμούς συντελεστών κέρδους στα πηγάδια της δεξαμενής προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Εξάγονται συμπεράσματα ως προς το βέλτιστο μείγμα παραγωγής, ως προς την στρατηγικής σημασίας τοποθέτηση των πηγαδιών στην επιφάνεια της δεξαμενής, αλλά και ως προς τη βαρύτητα κάθε πηγαδιού στην διαδικασία της παραγωγής. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν υπογραμμίζουν την αναγκαιότητα χρήσης μοντέλου βελτιστοποίησης στον προγραμματισμό της παραγωγής φυσικού αερίου και αποδεικνύουν πως το μοντέλο υπό εξέταση δύναται να αξιοποιηθεί προς μεγιστοποίηση του κέρδους από τις εταιρείες παραγωγής φυσικού αερίου.

Πίνακας Περιεχομένων

1	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	9
1.1	ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	9
1.1.1	<i>Χρήσεις και εφαρμογές φυσικού αερίου.....</i>	<i>9</i>
1.1.2	<i>Πηγές φυσικού αερίου</i>	<i>10</i>
1.1.3	<i>Μεγέθη αποθηκευτικού χώρου κοιτάσματος φυσικού αερίου.....</i>	<i>12</i>
1.1.4	<i>Εφοδιαστική αλυσίδα φυσικού αερίου</i>	<i>14</i>
1.1.5	<i>Άντληση φυσικού αερίου.....</i>	<i>15</i>
1.1.6	<i>Κεφαλή πηγαδιού(wellhead).....</i>	<i>16</i>
1.1.7	<i>Ζήτηση φυσικού αερίου.....</i>	<i>18</i>
1.2	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	24
1.2.1	<i>Εισαγωγή στη Βελτιστοποίηση-Βασικές έννοιες.....</i>	<i>24</i>
1.2.2	<i>Τοπική και ολική βελτιστοποίηση</i>	<i>25</i>
1.2.3	<i>Κατηγοριοποίηση μεθόδων Βελτιστοποίησης.....</i>	<i>26</i>
1.2.4	<i>Μεικτός ακέραιος προγραμματισμός.....</i>	<i>27</i>
1.2.5	<i>Εξελικτικοί αλγόριθμοι.....</i>	<i>27</i>
1.2.6	<i>Optimization toolbox Matlab</i>	<i>29</i>
1.2.7	<i>Η συνάρτηση ga της Matlab</i>	<i>30</i>
1.2.8	<i>Βελτιστοποίηση στον τομέα του φυσικού αερίου</i>	<i>32</i>
1.3	ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	33
2	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	34
2.1	ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	34
2.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	36
2.3	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	37
2.3.1	<i>Αντικειμενική συνάρτηση.....</i>	<i>37</i>
2.3.2	<i>Επεξήγηση περιορισμών</i>	<i>38</i>
2.4	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ.....	38
2.4.1	<i>Αδιάστατος χρόνος tD.....</i>	<i>40</i>
2.4.2	<i>Μοντέλο μητρώου εξισώσεων επιρροής</i>	<i>40</i>

2.5	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	41
3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	42
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	42
3.2	ΠΗΓΑΔΙΑ	42
3.3	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ	44
3.4	ΖΗΤΗΣΗ	45
3.5	ΜΗΤΡΩΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΕΠΙΡΡΟΗΣ	46
3.6	ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ	47
3.7	ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ	48
3.8	Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ	48
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	50
4.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ 5 ΠΗΓΑΔΙΑ ΚΑΙ 1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	50
4.1.1	<i>Αντικειμενική Συνάρτηση</i>	<i>50</i>
4.1.2	<i>Μεταβλητές απόφασης</i>	<i>53</i>
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ 5 ΠΗΓΑΔΙΑ ΚΑΙ 2 ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ	56
4.2.1	<i>Αντικειμενική συνάρτηση</i>	<i>56</i>
4.2.2	<i>Μεταβλητές απόφασης</i>	<i>57</i>
4.3	ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	59
4.3.1	<i>Αντικειμενική συνάρτηση</i>	<i>59</i>
4.3.2	<i>Μεταβλητές απόφασης</i>	<i>59</i>
4.4	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	64
4.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	69
4.6	ΟΡΘΟΤΗΤΑ-ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	73
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	74
5.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	74
5.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	75
6	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΩΝ	78

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Τύποι υπόγειων κοιτασμάτων φυσικού αερίου.....	11
Σχήμα 1-2:Βήματα παραγωγής φυσικού αερίου από την πηγή στον καταναλωτή	15
Σχήμα 1-3:Κεφαλή πηγαδιού φυσικού αερίου(wellhead).....	17
Σχήμα 1-4:Αποθέματα φυσικού αερίου ανά γεωγραφικό διαμέρισμα(τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια).....	19
Σχήμα 1-5:Προοπτική κατανομής της παραγωγής φυσικού αερίου 2014-2035 ...	19
Σχήμα 1-6:Προοπτική ενεργειακού ισοζυγίου 2013-2035.....	20
Σχήμα 1-7:Κατανάλωση φυσικού αερίου κατά τομέα για την περίοδο 2010-2040	21
Σχήμα 1-8:Ηλεκτρική παραγωγική ικανότητα που θα προστεθεί στο ενεργειακό μείγμα των ΗΠΑ 2010-2035(gigawatts).....	23
Σχήμα 2-1:Δεξαμενή Φυσικού αερίου με δύο πηγάδια	39
Σχήμα 3-1:Διάταξη πηγών στην επιφάνεια της υποθετικής δεξαμενής.....	43
Σχήμα 3-2:Μηνιαία ζήτηση στην δεξαμενή υπό εξέταση.	45
Σχήμα 3-3:Αρχείο m. που καλεί την συνάρτηση ga για τους υπολογισμούς του προβλήματος.	49
Σχήμα 4-1:Διαγράμματα της Matlab για 5 πηγάδια και 1 πηγή(α).	51
Σχήμα 4-2:Διαγράμματα της Matlab για 5 πηγάδια και 1 πηγή(β).	52
Σχήμα 4-3:Ρυθμοί άντλησης ανά πηγάδι για τις 10 χρονικές περιόδους.....	55
Σχήμα 4-4: Μέσο ποσοστό συνεισφοράς άντλησης 5 πηγαδιών.....	55
Σχήμα 4-5:Κέρδος αντικειμενικής συνάρτησης για 5 πηγάδια και 2 χρονικές περιόδους.	57
Σχήμα 4-6:Χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου για 5 πηγάδια και 2 χρονικές περιόδους	57
Σχήμα 4-7:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 1.....	61
Σχήμα 4-8:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 2.....	61
Σχήμα 4-9:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 3.....	62
Σχήμα 4-10:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 4.....	62

Σχήμα 4-11:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 5.....	63
Σχήμα 4-12: Συνολική μηνιαία συνεισφορά πηγαδιών για το Βασικό σενάριο.	64
Σχήμα 4-13:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 1.	66
Σχήμα 4-14:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 2.	66
Σχήμα 4-15:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 3.	67
Σχήμα 4-16:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 4.	67
Σχήμα 4-17:Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 5.	68
Σχήμα 4-18:Συνολική μηνιαία συνεισφορά πηγαδιών για το Εναλλακτικό σενάριο.	69
Σχήμα 4-19: Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_1	70
Σχήμα 4-20:Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_2	70
Σχήμα 4-21:Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_3	71
Σχήμα 4-22:Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_4	71
Σχήμα 4-23:Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_5	72

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Βασικά Ορίσματα συνάρτησης g_a	30
Πίνακας 2-1: Πίνακας Συμβόλων Μαθηματικού μοντέλου.	34
Πίνακας 3-1:Αποστάσεις πηγαδιών.	43
Πίνακας 3-2:Συντελεστές κέρδους πηγαδιών.	44
Πίνακας 3-3:Δεδομένα για υπολογισμό μητρώου επιρροής.	46
Πίνακας 3-4:Τιμές μητρώων επιρροής.	47
Πίνακας 4-1:Αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης για 10 δοκιμές.....	50
Πίνακας 4-2:Ρυθμοί άντλησης των 5 πηγαδιών στις 10 δοκιμές.....	53
Πίνακας 4-3:Συντελεστές κέρδους για κάθε πηγάδι.....	54
Πίνακας 4-4:Αποτελέσματα κέρδους-χρόνου για τις 7 δοκιμές.	56
Πίνακας 4-5:Ρυθμοί άντλησης κάθε πηγαδιού για τις 7 δοκιμές.	58
Πίνακας 4-6:Ρυθμοί άντλησης για το βασικό σενάριο.....	60
Πίνακας 4-7:Ρυθμοί άντλησης για το εναλλακτικό σενάριο.....	65
Πίνακας 4-8: Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις δύο μεθόδους.....	73

1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Το φυσικό αέριο

Το Φυσικό Αέριο είναι αέριο μείγμα κορεσμένων υδρογονανθράκων με μικρό αριθμό ατόμων άνθρακα . Εξάγεται από υπόγειες κοιλότητες και εξαιτίας των ιδιοτήτων του θεωρείται οικολογικό καύσιμο. Βασικό συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο, συνυπάρχουν, όμως, σε αυτό και σημαντικές ποσότητες αιθανίου, προπάνιου και βουτανίου, καθώς και διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, υδρογόνο, ήλιο και υδρόθειο.

Το φυσικό αέριο που είναι απαλλαγμένο από τους υδρογονάνθρακες πέραν του μεθανίου, συχνά αποκαλείται ξηρό φυσικό αέριο. Αντίστοιχα, το φυσικό αέριο που συμπεριλαμβάνει και άλλους υδρογονάνθρακες εκτός από το μεθάνιο, αποκαλείται υγρό φυσικό αέριο.

Το φυσικό αέριο είναι άχρωμο και άοσμο. Η χαρακτηριστική του οσμή δίνεται τεχνικά ώστε να γίνεται αντιληπτό σε τυχόν διαρροές. Ανήκει στη δεύτερη οικογένεια των αέριων καυσίμων. Είναι ελαφρύτερο από τον αέρα: έχει ειδικό βάρος ίσο με 0,59.

Η καύση του, σε σχέση με αυτή άλλων καυσίμων όπως ο γαιάνθρακας ή το λάδι, έχει λιγότερο επιβλαβείς συνέπειες για το περιβάλλον. Παράγει, για παράδειγμα, μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα για κάθε μονάδα παραγόμενης ενέργειας(Natural Gas Organization, 2015).

1.1.1 Χρήσεις και εφαρμογές φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο έχει πολλές χρήσεις, με βασικότερες από αυτές να είναι οι κάτωθι (Natural Gas Organization, 2015):

- Αποτελεί βασική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Χρησιμοποιείται στην παραγωγή υδρογόνου.
- Χρησιμεύει ως καύσιμο οχημάτων (οικολογικά οχήματα). Το 2005, οι χώρες με τον μεγαλύτερο αριθμό οικολογικών οχημάτων ήταν η Αργεντινή, η Βραζιλία, το Πακιστάν, η Ιταλία, το Ιράν και οι Η.Π.Α.. Γίνονται, επίσης, προσπάθειες για χρήση του και στην αεροπορία.

- Οικιακή χρήση (μαγειρική, θέρμανση κ.α.)
- Άλλες χρήσεις (παραγωγή γυαλιού, υφασμάτων, ατσαλιού, πλαστικών, ειδών χρωματισμού και άλλων προϊόντων)

Η χημική σύσταση του φυσικού αερίου (και των ομοειδών του) καθώς και η σύσταση των καυσαερίων του, συνιστούν δυο συνθήκες με υψηλό ενδιαφέρον από την σκοπιά της λειτουργίας με υψηλό βαθμό απόδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας ιδίως στις οικιακές εφαρμογές:

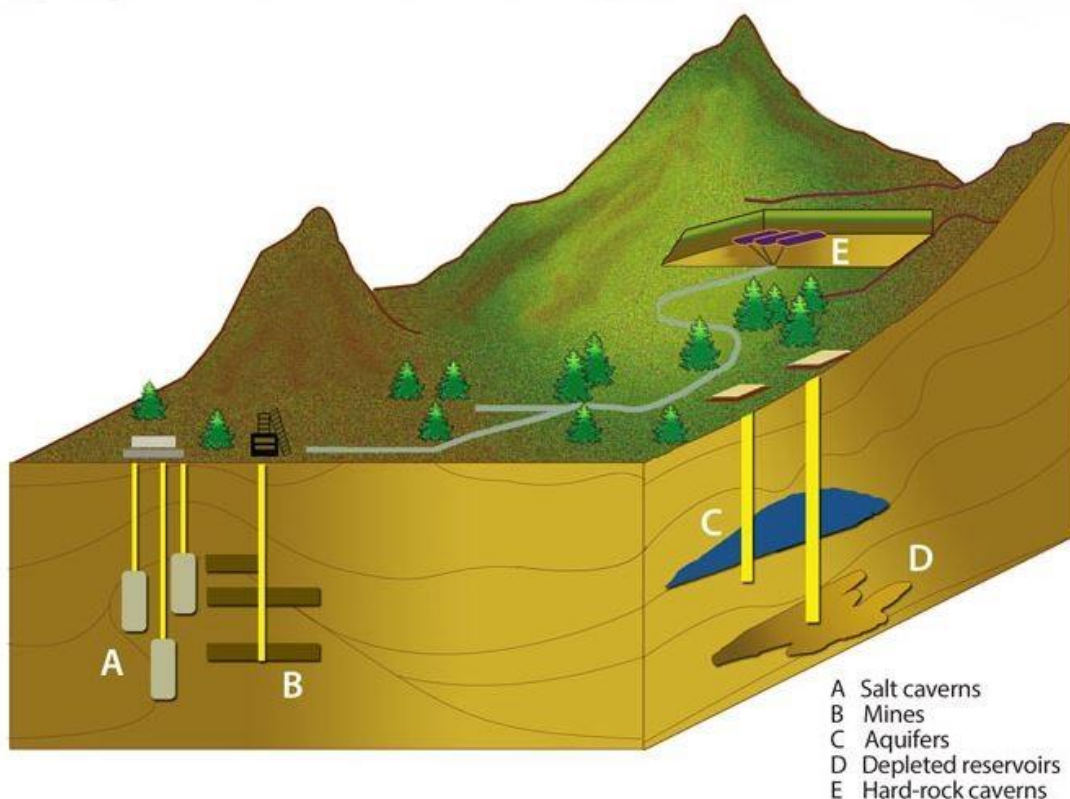
- Εξαιτίας της απουσίας προσμίξεων επιβαρυντικών για τα μέρη των συσκευών και των εγκαταστάσεων (καυστήρες, θάλαμοι καύσης, απαγωγή καυσαερίων κλπ.), είναι απολύτως εφικτή η διατήρηση σταθερού βαθμού απόδοσης για ιδιαίτερα μεγάλες περιόδους.

- Επειδή τα προϊόντα της καύσης του φυσικού αερίου αποτελούνται κυρίως από νερό (υδρατμούς), καθίσταται εύκολα δυνατή η αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας των καυσαερίων (διαδικασία συμπύκνωσης), με αποτέλεσμα την αύξηση (πάνω από 20%) της ωφέλιμης θερμότητας που λαμβάνεται από δεδομένη ποσότητα καυσίμου - σημαντικό πλεονέκτημα για τον τελικό καταναλωτή αφού μπορεί να εξυπηρετήσει την εγκατάστασή του με λιγότερο καύσιμο.

1.1.2 Πηγές φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο είναι ένας αέριος υδρογονάνθρακας που μπορεί να αποθηκευτεί με διάφορους τρόπους. Συχνά κρατιέται σε υπόγεια κοιτάσματα υπό πίεση σε τρεις τύπους εγκαταστάσεων. Αυτές οι υπόγειες εγκαταστάσεις είναι σε εξαντλημένες δεξαμενές σε κοιτάσματα πετρελαίου ή και φυσικού αερίου, υδροφορείς(aquifers) και σε σχηματισμούς σπηλαίων άλατος. Το φυσικό αέριο αποθηκεύεται, επίσης, σε υγρή ή αέρια μορφή σε δεξαμενές πάνω από το έδαφος. Στο Σχήμα 1-1 φαίνονται μέσω γραφικής αναπαράστασης οι τύποι των υπόγειων κοιτασμάτων φυσικού αερίου.

Types of underground natural gas storage facilities



Σχήμα 1-1: Τύποι υπόγειων κοιτασμάτων φυσικού αερίου

(Πηγή: U.S. Energy Information Administration)

Κάθε τύπος αποθήκευσης έχει τα δικά του φυσικά χαρακτηριστικά (πορώδες, διαπερατότητα, ικανότητα συγκράτησης) και οικονομικά χαρακτηριστικά (κόστος προετοιμασίας και συντήρησης, ποσοστά παράδοσης), που διέπουν την καταλληλότητα του για συγκεκριμένες εφαρμογές. Δύο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας υπόγειας δεξαμενής αποθήκευσης είναι η ικανότητά της να διατηρεί το φυσικό αέριο για μελλοντική χρήση και ο ρυθμός με τον οποίο το απόθεμα φυσικού αερίου μπορεί να αντληθεί, που ονομάζεται ποσοστό παραδόσεώς του (Flanigan, 1995).

Οι περισσότερες υπάρχουσες αποθήκες φυσικού αερίου βρίσκονται σε εξαντλημένα πεδία πετρελαίου που βρίσκονται κοντά σε κέντρα κατανάλωσης. Η μετατροπή ενός πεδίου από την παραγωγή στην αποθήκευση εκμεταλλεύεται τα υπάρχοντα πηγάδια, τα συστήματα συλλογής και τις συνδέσεις των αγωγών. Οι εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες υπόγειες τοποθεσίες κοιτασμάτων λόγω της ευρείας διαθεσιμότητάς τους.

Σε μερικές περιοχές, οι φυσικοί υδροφορείς έχουν μετατραπεί σε δεξαμενές αποθήκευσης φυσικού αερίου. Ένας υδροφορέας είναι κατάλληλος για αποθήκευση αερίου εάν ο σχηματισμός ιζηματογενών πετρωμάτων που φέρει νερό, επικαλύπτεται με αδιαπέραστο πέτρωμα. Αν και η γεωλογία των υδροφορέων είναι παρόμοια με τα πεδία με εξαντλημένη παραγωγή, η χρήση τους για αποθήκευση φυσικού αερίου απαιτεί συνήθως περισσότερο αέριο βάσης (μαξιλάρι) και επιτρέπει λιγότερη ευελιξία στην έγχυση και την απόσυρση. Οι ρυθμοί παραδόσεως μπορούν να ενισχυθούν με την παρουσία ενεργού κινητήρα νερού, ο οποίος υποστηρίζει την πίεση της δεξαμενής μέσω των κύκλων έγχυσης και παραγωγής.

Τα σπήλαια αλάτων παρέχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς απόσυρσης και έγχυσης σε σχέση με την χωρητικότητα φυσικού αερίου που διαθέτουν. Οι απαιτήσεις για το αέριο βάσης είναι σχετικά χαμηλές. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις αποθήκευσης σπηλαίων άλατος έχουν αναπτυχθεί σε σχηματισμούς άλατος θόλου. Σπήλαια αλάτων έχουν, επίσης, κατασκευαστεί (με μια διαδικασία που ονομάζεται έκπλυση(leaching)) σε διαμορφωμένους αλατούχους σχηματισμούς στις βορειοανατολικές, μεσοδυτικές και νοτιοδυτικές πολιτείες των ΗΠΑ. Η κατασκευή σπηλαίων είναι πιο δαπανηρή από τις εξαντλημένες μετατροπές πεδίου όταν μετριέται με βάση τα δολάρια ανά χίλια κυβικά πόδια χωρητικότητας αερίου. Όμως, η ικανότητα να εκτελούνται αρκετοί κύκλοι απόσυρσης και έγχυσης μειώνει κάθε χρόνο το κόστος ανά χίλια κυβικά πόδια φυσικού αερίου που εγχέεται και αποσύρεται (Xue et al., 2017).

1.1.3 Μεγέθη αποθηκευτικού χώρου κοιτάσματος φυσικού αερίου

Χρησιμοποιούνται διάφορα ογκομετρικά μεγέθη για την ποσοτικοποίηση των θεμελιωδών χαρακτηριστικών μιας υπόγειας εγκατάστασης αποθήκευσης και του αερίου που περιέχεται σε αυτήν. Για ορισμένα από τα μέτρα αυτά, είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ του χαρακτηριστικού μίας εγκατάστασης, όπως η χωρητικότητά της, και του χαρακτηριστικού του φυσικού αερίου εντός της εγκατάστασης, όπως είναι το πραγματικό επίπεδο αποθέματος. Τα μεγέθη αυτά έχουν ως εξής:

1.1.3.1 Συνολική χωρητικότητα κοιτάσματος φυσικού αερίου

Αποτελεί τον μέγιστο όγκο φυσικού αερίου που μπορεί να αποθηκευτεί σε μια υπόγεια εγκατάσταση αποθήκευσης σύμφωνα με την γεωμετρία της, τον εγκατεστημένο εξοπλισμό και τις διαδικασίες λειτουργίας της εγκατάστασης.

1.1.3.2 *Αέριο Βάσης*

Το αέριο βάσης ή αλλιώς αέριο-μαξιλάρι, είναι ο όγκος φυσικού αερίου που προορίζεται ως μόνιμο απόθεμα σε δεξαμενή αποθήκευσης για τη διατήρηση επαρκών ποσοστών πίεσης και ποσοστών παράδοσης καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου άντλησης. Η χωρητικότητα αερίου εργασίας αναφέρεται στην συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης αερίου μείον το αέριο βάσης.

1.1.3.3 *Βαθμός παράδοσης*

Η παράδοση εκφράζεται συνήθως ως μέτρο της ποσότητας αερίου που μπορεί να παραδοθεί (αντληθεί) από μια εγκατάσταση αποθήκευσης σε καθημερινή βάση. Αναφέρεται, επίσης, ως ρυθμός παράδοσης, ρυθμός άντλησης ή ικανότητα άντλησης και είναι συνήθως εκφρασμένη σε εκατομμύρια κυβικά πόδια την ημέρα (MMcf / d).

Ο ρυθμός άντλησης ενός δεδομένου αποθηκευτικού χώρου είναι μεταβλητός και εξαρτάται από παράγοντες, όπως η ποσότητα φυσικού αερίου στη δεξαμενή σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η πίεση εντός της δεξαμενής, η ικανότητα συμπίεσης που είναι διαθέσιμη στη δεξαμενή, η διαμόρφωση και οι δυνατότητες των εγκαταστάσεων που σχετίζονται με τη δεξαμενή και άλλους παράγοντες. Σε γενικές γραμμές, ο ρυθμός παράδοσης μιας εγκατάστασης ποικίλλει και σχετίζεται άμεσα με τη συνολική ποσότητα φυσικού αερίου στη δεξαμενή: είναι στην υψηλότερη τιμή της όταν η δεξαμενή είναι πιο πλήρης και μειώνεται καθώς αποσύρεται το αέριο εργασίας (Mokhatab and Mak, 2015).

1.1.3.4 *Ικανότητα έγχυσης*

Η ικανότητα έγχυσης (ή ρυθμός) είναι το συμπληρωματικό της παράδοσης ή του ποσοστού άντλησης - είναι η ποσότητα φυσικού αερίου που μπορεί να εγχέεται σε μια αποθήκη σε καθημερινή βάση. Όπως συμβαίνει και με την παράδοση, η ικανότητα έγχυσης συνήθως εκφράζεται σε MMcf / d, αν και χρησιμοποιείται και Dekatherms / ημέρα. Η ικανότητα έγχυσης μιας εγκατάστασης αποθήκευσης είναι, επίσης, μεταβλητή και εξαρτάται από παράγοντες συγκρίσιμους με αυτούς που καθορίζουν την παράδοση. Αντίθετα, ο ρυθμός έγχυσης μεταβάλλεται αντίστροφα με τη συνολική ποσότητα του αποθηκευμένου αερίου: βρίσκεται στο χαμηλότερο σημείο του όταν η δεξαμενή είναι περισσότερο γεμάτη και αυξάνεται καθώς αποσύρεται το αέριο εργασίας.

Κανένα από τα μέτρα αυτά για οποιαδήποτε δεδομένη εγκατάσταση αποθήκευσης δεν είναι σταθερό ή απόλυτο. Τα ποσοστά της έγχυσης και της άντλησης αλλάζουν καθώς το επίπεδο φυσικού αερίου ποικίλλει εντός της εγκατάστασης. Στην πράξη, μια εγκατάσταση αποθήκευσης μπορεί να είναι σε θέση να υπερβεί την πιστοποιημένη συνολική χωρητικότητα σε ορισμένες περιπτώσεις με υπέρβαση ορισμένων λειτουργικών παραμέτρων.

Η συνολική χωρητικότητα της εγκατάστασης μπορεί, επίσης, να ποικίλει, προσωρινά ή μόνιμα, καθώς οι καθοριστικές παράμετροι της ποικίλλουν. Τα μέτρα του βασικού αερίου, του αερίου εργασίας και της χωρητικότητας αερίου εργασίας μπορούν επίσης να αλλάζουν από καιρό σε καιρό. Αυτές οι αλλαγές συμβαίνουν, για παράδειγμα, όταν ένας φορέας αποθήκευσης ανακατατάσσει μια κατηγορία φυσικού αερίου στην άλλη, συχνά ως αποτέλεσμα νέων πηγαδιών, εξοπλισμού ή πρακτικών λειτουργίας (μια τέτοια αλλαγή γενικά απαιτεί έγκριση από την αρμόδια ρυθμιστική αρχή). Τέλος, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης μπορούν να αντλήσουν το αέριο βάσης για προμήθεια στην αγορά σε περιόδους ιδιαίτερα απαιτητικής ζήτησης, αν και εξ ορισμού το αέριο αυτό δεν προορίζεται για τη χρήση αυτή (Brown et al., 1992).

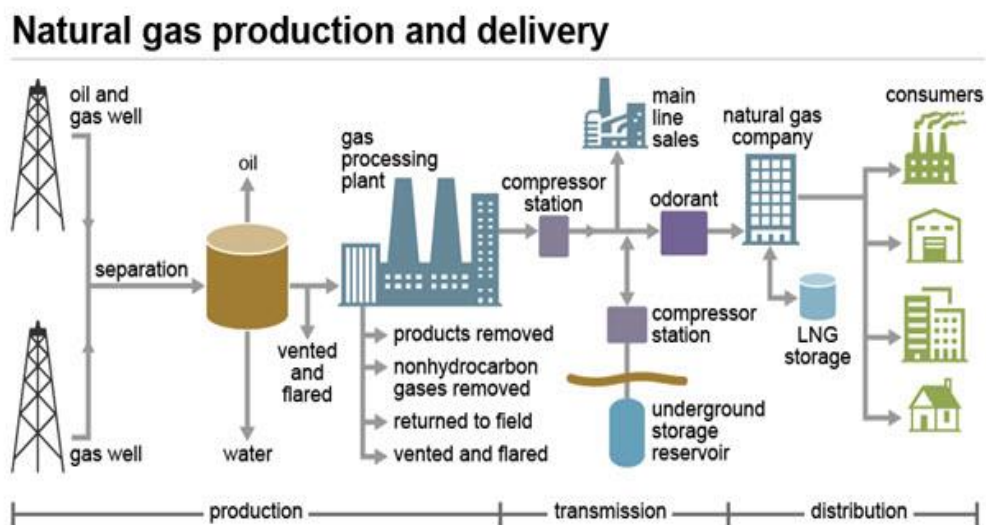
1.1.4 Εφοδιαστική αλυσίδα φυσικού αερίου

Τα ακόλουθα βήματα εμπλέκονται στην εφοδιαστική αλυσίδα του φυσικού αερίου που ξεκινάει από τη διαδικασία άντλησης του φυσικού αερίου από το έδαφος και καταλήγει στον τελικό του προορισμό (Lyons et al., 2016).

- Εξερεύνηση(Exploration): Σε αυτό το στάδιο, το ζήτημα αναζητείται ο τρόπος με τον οποίο το φυσικό αέριο εντοπίζεται και ερευνώνται οι τοποθεσίες που θα πραγματοποιηθούν γεωτρήσεις ώστε να εγκατασταθούν τα πηγάδια.
- Εξόρυξη(Extraction): Αυτό το στάδιο ασχολείται με τη διαδικασία γεώτρησης και με τον τρόπο με τον οποίο το φυσικό αέριο αντλείται από τις υπόγειες δεξαμενές στην επιφάνεια.
- Παραγωγή(Production): Σε αυτό το στάδιο συμβαίνει η επεξεργασία του φυσικού αερίου μόλις βγει από το έδαφος.
- Μεταφορά(Transport): Το φυσικό αέριο μεταφέρεται από τη μονάδα επεξεργασίας στις τοπικές εταιρείες διανομής.

- Αποθήκευση(Storage): Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την αποθήκευση του φυσικού αερίου.
- Διανομή(Distribution): Το φυσικό αέριο παραδίδεται μέσω μεγάλων αγωγών στους τελικούς χρήστες.
- Μάρκετινγκ(Marketing): Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τη δραστηριότητα αγοράς/πώλησης από τους εμπόρους φυσικού αερίου.

Στο Σχήμα 1-2 παρουσιάζονται τα παραπάνω βήματα μέσω γραφήματος



Σχήμα 1-2:Βήματα παραγωγής φυσικού αερίου από την πηγή στον καταναλωτή

(Πηγή: U.S. Energy Information Administration)

1.1.5 Άντληση φυσικού αερίου

Μόλις εντοπιστεί ένα πιθανό κοίτασμα φυσικού αερίου από μια ομάδα γεωλόγων και γεωφυσικών, εναπόκειται σε μία ομάδα εμπειρογνομένων γεώτρησης να σκάψουν μέχρι εκεί που πιστεύεται ότι υπάρχει το φυσικό αέριο.

Η απόφαση του εάν πρέπει να εγκατασταθεί ένα πηγάδι σε μία τοποθεσία εξαρτάται από μία ποικιλία παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της οικονομικής δυνατότητας του κοιτάσματος φυσικού αερίου. Κοστίζει τεράστια κεφάλαια στις εταιρείες η εξερεύνηση και η παραγωγή και υπάρχει πάντα εγγενής κίνδυνος να μην βρεθεί φυσικό αέριο ή να μην μπορεί να αντληθεί.

Η ακριβής τοποθέτηση του πηγαδιού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η φύση της υποεπιφανειακής γεωλογίας και το βάθος και το μέγεθος του κοιτάσματος. Αφού η γεωφυσική ομάδα εντοπίσει τη βέλτιστη θέση για ένα πηγάδι, είναι απαραίτητο για την εταιρεία γεώτρησης να εξασφαλίσει ότι θα ολοκληρώσει όλα τα απαραίτητα βήματα ώστε να μπορέσει να ασκήσει τη διαδικασία της άντλησης επιτυχώς και με το μεγαλύτερο κέρδος.

Εάν το νέο πηγάδι, μόλις εγκατασταθεί, έρχεται σε επαφή με κοιτάσματα φυσικού αερίου, αναπτύσσεται για να επιτρέψει την εξόρυξη αυτού του φυσικού αερίου και ονομάζεται "αναπτυξιακό" ή "παραγωγικό" πηγάδι. Σε αυτό το σημείο, με το πηγάδι εγκατεστημένο και τους υδρογονάνθρακες που υπάρχουν, το πηγάδι μπορεί να ολοκληρωθεί για να διευκολύνει την παραγωγή φυσικού αερίου. Ωστόσο, αν η ομάδα γεωφυσικών ήταν εσφαλμένη στην εκτίμησή της για την ύπαρξη εμπορεύσιμης ποσότητας φυσικού αερίου σε ένα εργοτάξιο, το πηγάδι ονομάζεται "ξηρό πηγάδι" και η παραγωγή δεν προχωρά (Brown et al., 2008).

1.1.6 Κεφαλή πηγαδιού(wellhead)

Η κεφαλή του πηγαδιού αποτελείται από τα τεμάχια εξοπλισμού, που είναι τοποθετημένα στο άνοιγμα του πηγαδιού για τη διαχείριση της εξαγωγής των υδρογονανθράκων από τον υπόγειο σχηματισμό και αποτελεί το πιο σημαντικό μέρος του πηγαδιού, καθώς από εκεί ορίζεται και ρυθμίζεται η διαδικασία της άντλησης του φυσικού αερίου.

Προλαμβάνει την διαρροή φυσικού αερίου από το πηγάδι και αποτρέπει τις εκρήξεις που προκαλούνται από την υψηλή πίεση. Τα κοιτάσματα που βρίσκονται σε υψηλή πίεση, τυπικά απαιτούν κεφαλές που μπορούν να αντέξουν πιέσεις έως και 20000 psia (Jang and Lee, 2015). Η κεφαλή αποτελείται από τρία μέρη: την κεφαλή του περιβλήματος, την κεφαλή σωλήνωσης και το «χριστουγεννιάτικο δέντρο». Στο Σχήμα 1-3 απεικονίζεται μία τυπική διάταξη κεφαλής πηγαδιού.



Σχήμα 1-3:Κεφαλή πηγαδιού φυσικού αερίου(wellhead)

(Πηγή: Naturalgas.org)

1.1.6.1 Κεφαλή περιβλήματος

Η κεφαλή του περιβλήματος αποτελείται από βαριά εξαρτήματα που παρέχουν σφράγιση μεταξύ του περιβλήματος και της επιφάνειας. Η κεφαλή του περιβλήματος χρησιμεύει, επίσης, για τη στήριξη ολόκληρου του μήκους του περιβλήματος που εκτείνεται μέχρι το πηγάδι. Αυτό το κομμάτι του εξοπλισμού περιέχει συνήθως ένα μηχανισμό πιασίματος που εξασφαλίζει στεγανή σφράγιση μεταξύ κεφαλής και περιβλήματος.

1.1.6.2 Κεφαλή σωλήνα

Η κεφαλή του σωλήνα μοιάζει πολύ με την κεφαλή του περιβλήματος. Παρέχει μια σφράγιση μεταξύ του σωλήνα, που τρέχει μέσα στο περίβλημα, και της επιφάνειας. Όπως και η κεφαλή του περιβλήματος, η κεφαλή του σωλήνα έχει σχεδιαστεί για υποστηρίζει όλο το μήκος του περιβλήματος, καθώς, επίσης, παρέχει συνδέσεις στην επιφάνεια, οι οποίες επιτρέπουν τη ροή των ρευστών έξω από το πηγάδι.

1.1.6.3 «Χριστουγεννιάτικο δέντρο»

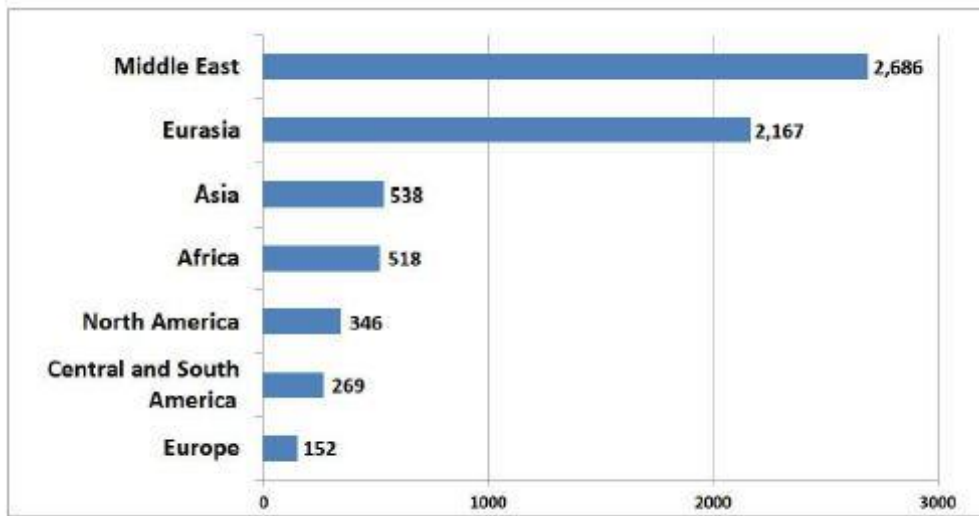
Το "χριστουγεννιάτικο δέντρο" είναι το κομμάτι του εξοπλισμού που ταιριάζει στην κορυφή των κεφαλών του περιβλήματος και των σωληνώσεων και περιέχει σωλήνες και βαλβίδες που ελέγχουν τη ροή υδρογονανθράκων και άλλων υγρών από το πηγάδι. Συχνά περιέχει πολλούς κλάδους και διαμορφώνεται κάπως σαν ένα δέντρο, επομένως το όνομά του, «χριστουγεννιάτικο δέντρο». Το χριστουγεννιάτικο δέντρο είναι το πιο ορατό τμήμα ενός πηγαδιού παραγωγής και επιτρέπει την επιφανειακή παρακολούθηση και ρύθμιση της παραγωγής υδρογονανθράκων. Ένα τυπικό χριστουγεννιάτικο δέντρο είναι περίπου έξι πόδια ψηλό.

1.1.7 Ζήτηση φυσικού αερίου

Με την αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, το φυσικό αέριο διαδραματίζει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Ανησυχώντας για την υπερθέρμανση του πλανήτη και την έλλειψη αργού πετρελαίου, οι άνθρωποι έχουν αρχίσει να ενδιαφέρονται περισσότερο για το φυσικό αέριο που αποτελεί μια σχετικά καθαρή πηγή ενέργειας και υπάρχει σε αφθονία σε πολλά μέρη. Το φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και, όταν καίγεται, απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας αλλά λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου (πχ CO₂) από το πετρέλαιο ή τον άνθρακα.

Ενώ γίνεται εκτενής χρήση φυσικού αερίου τις τελευταίες δεκαετίες, εξακολουθούν να υπάρχουν τεράστιες ποσότητες αποθεμάτων φυσικού αερίου στον κόσμο. Τα αποθέματα εκτιμώνται σε 6,676 τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια, 422 τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια πιο πάνω από την εκτίμηση για το 2009 . Αυτό ακολουθεί τη γενική ανοδική πορεία των παγκόσμιων αποθεμάτων φυσικού αερίου κατά τη διάρκεια των ετών. Με μερίδιο περίπου 40,2%, η Μέση Ανατολή έχει τα μεγαλύτερα αποθέματα φυσικού αερίου στον κόσμο, ακολουθούμενη από την Ευρασία με 32,5% και την Ασία με 8,1%. Σε επίπεδο χώρας, η Ρωσία διαθέτει περίπου το 26,9% των παγκόσμιων αποθεμάτων φυσικού αερίου ενώ κατέχει μαζί με το Ιράν (15,9%) και το Κατάρ (14,3%) περίπου το 57% των παγκόσμιων αποθεμάτων φυσικού αερίου. Οι 20 ισχυρότερες χώρες κατέχουν το 90,7% (BP, 2017). Ως εκ τούτου, η παραγωγή και ανάκτηση του φυσικού αερίου θα εξακολουθήσει να αποτελεί σημαντικό καθήκον στο μέλλον. Στο Σχήμα 1-4 φαίνονται τα αποθέματα φυσικού αερίου ανά γεωγραφικό διαμέρισμα, ενώ στο Σχήμα 1-5 φαίνεται το μερίδιο κάθε χώρας στην παραγωγή φυσικού αερίου για την

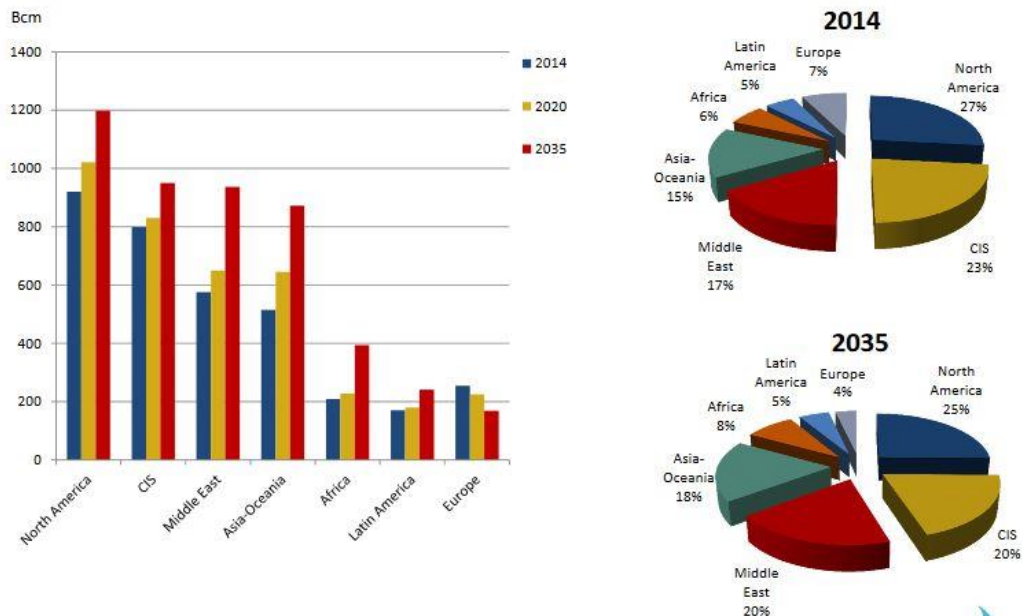
περίοδο 2014-2035 και πως η Μέση Ανατολή που κατέχει τα μεγαλύτερα αποθέματα φυσικού αερίου παρουσιάζει σταθερή ανάπτυξη.



Σχήμα 1-4: Αποθέματα φυσικού αερίου ανά γεωγραφικό διαμέρισμα (τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια)

(Πηγή: Oil & Gas Journal)

Natural gas production prospects

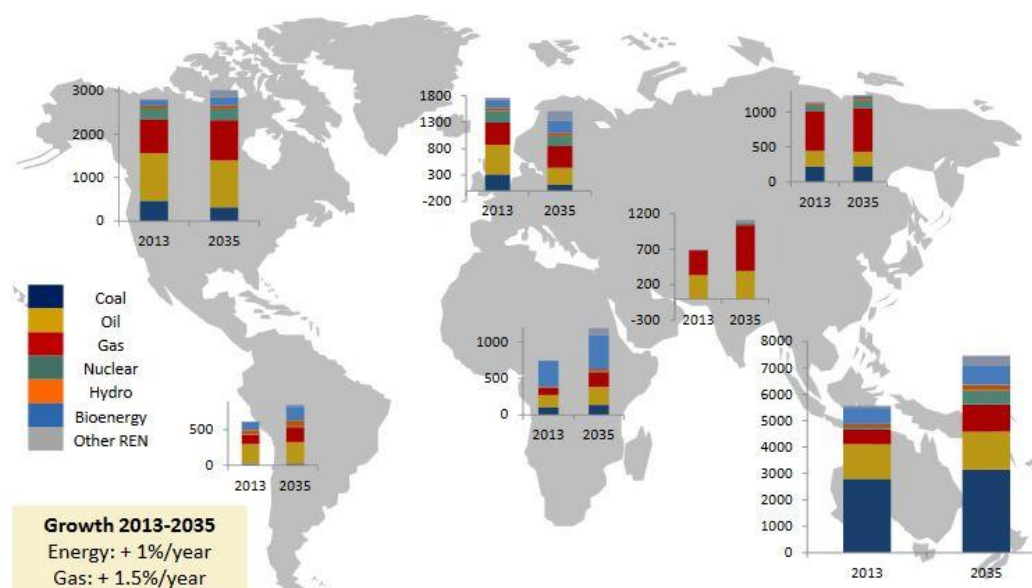


Σχήμα 1-5: Προοπτική κατανομής της παραγωγής φυσικού αερίου 2014-2035

(Πηγή: U.S. Energy Information Administration)

Το φυσικό αέριο θεωρείται από πολλούς πως θα αποτελέσει βασική πηγή ενέργειας για το μέλλον. Η αφθονία του φυσικού αερίου σε συνδυασμό με τις περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις του και τις πολλαπλές εφαρμογές του κατά μήκος όλων των τομέων, εγγυάται πως το φυσικό αέριο θα συνεχίσει να διαδραματίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στην κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης σε πολλές χώρες. Στο Σχήμα 1-6 φαίνεται πως στις διάφορες περιοχές του πλανήτη επιλέγεται ένα ενεργειακό μείγμα πιο πλούσιο σε φυσικό αέριο, κερδίζοντας συνεχώς περισσότερο χώρο από αυτόν που αφήνει η μείωση της χρήσης του άνθρακα.

Prospects for energy balance by region



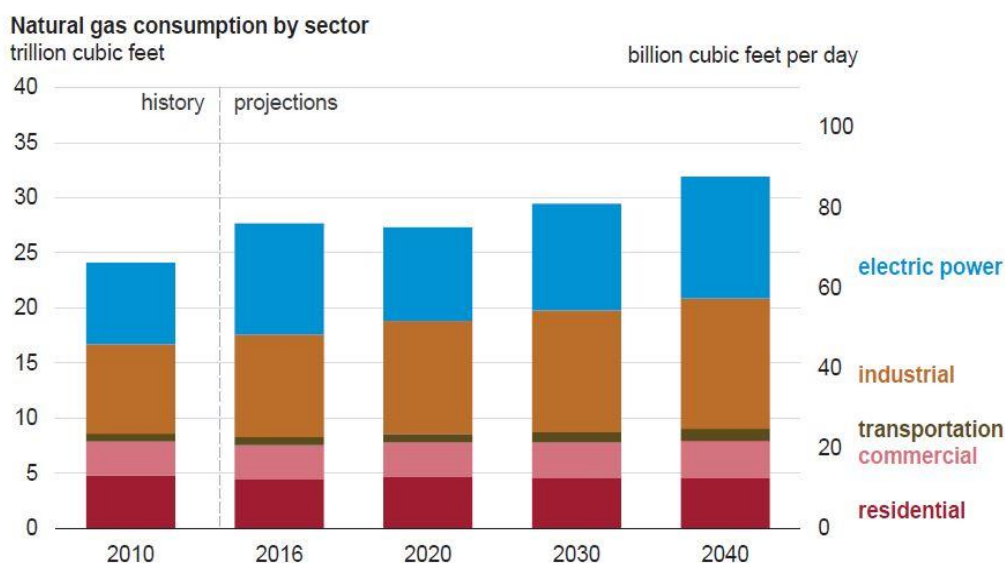
Σχήμα 1-6: Προοπτική ενεργειακού ισοζυγίου 2013-2035

(Πηγή: U.S. Energy Information Administration)

Ενώ βραχυπρόθεσμοι παράγοντες (πχ πολιτικοί) μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη ζήτηση για φυσικό αέριο, οι μακροπρόθεσμοι παράγοντες υποδεικνύουν τις βασικές τάσεις για τις χρήσεις του φυσικού αερίου στο μέλλον (Panarakidis and Dragoumas, 2016).

Προκειμένου να αναλυθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την μακροπρόθεσμη ζήτηση για φυσικό αέριο, είναι σοφό να εξεταστεί η ζήτηση του φυσικού αερίου ανά τομέα. Οι τρεις πιο σημαντικοί τομείς είναι: η οικιακή και εμπορική ζήτηση, η βιομηχανική ζήτηση και η ζήτηση του τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η

κατανάλωση του φυσικού αερίου κατά τομέα για την περίοδο 2010 με πρόβλεψη ως το 2040 φαίνεται στο Σχήμα 1-7. Είναι ωφέλιμο να εξεταστεί ο κάθε τομέας ξεχωριστά.



Σχήμα 1-7: Κατανάλωση φυσικού αερίου κατά τομέα για την περίοδο 2010-2040

(Πηγή: U.S. Energy Information Administration)

1.1.7.1 Οικιακή και εμπορική ζήτηση

Σύμφωνα με την Υπηρεσία Πληροφοριών Ενέργειας των ΗΠΑ (U.S. Energy Information Administration- EIA) η οικιακή και εμπορική ζήτηση ενέργειας στις ΗΠΑ αναμένεται να αυξηθεί κατά 8% ανάμεσα στο 2016 και το 2040. Η κατανάλωση φυσικού αερίου στον οικιακό τομέα περιλαμβάνει το 23% της συνολικής κατανάλωσης των ΗΠΑ.

Ίσως, ο πιο σημαντικός μακροπρόθεσμος παράγοντας ζήτησης φυσικού αερίου στον οικιακό τομέα είναι οι μελλοντικές εφαρμογές θέρμανσης κατοικίας. Μεταξύ του 1991 και του 2000, το 66% των νέων σπιτιών και το 57% των πολυκατοικιών που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιούσαν για θέρμανση φυσικό αέριο. Το 2010, το 54% των νέων κατοικιών που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιούσαν φυσικό αέριο. Η αύξηση του αριθμού των νέων κατοικιών με χρήση φυσικού αερίου για θέρμανση στα επόμενα 20 χρόνια αναμένεται να αποτελέσει ισχυρό παράγοντα ανάπτυξης για την οικιακή ζήτηση φυσικού αερίου.

Όσον αφορά την ενεργειακή ζήτηση στον εμπορικό τομέα, η EIA αναμένει ότι θα αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 1.1% έως το 2035. Το μέσο εμβαδόν εμπορικών κτηρίων αναμένεται, επίσης, να αυξάνεται κατά 1.2% ετησίως για την ίδια περίοδο, με

αποτέλεσμα η ενεργειακή ζήτηση ανά εμπορικό τετραγωνικό μέτρο αναμένεται να αυξάνεται κατά 0.1% ετησίως, αντανακλώντας την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Το φυσικό αέριο παρέχει σήμερα το 17% της ενέργειας που καταναλώνεται στον εμπορικό τομέα και θα συνεχίσει να καλύπτει τόσο υψηλό ποσοστό τουλάχιστον μέχρι το 2035.

1.1.7.2 Βιομηχανική ζήτηση

Η ΕΙΑ προβλέπει πως η βιομηχανική ζήτηση ενέργειας θα αυξάνεται με ετήσιο βαθμό ανάπτυξης 0.9% μέχρι το 2035. Η εκτίμηση αυτή αντιπροσωπεύει τις ενεργειακές απαιτήσεις τόσο για τις ενεργειακά απαιτητικές βιομηχανίες(που αναμένεται να μειωθούν) όσο και για τις ενεργειακά μη απαιτητικές βιομηχανίες(που αναμένεται να αυξηθούν). Η βιομηχανική ζήτηση αντιπροσωπεύει το 27% της ζήτησης φυσικού αερίου.

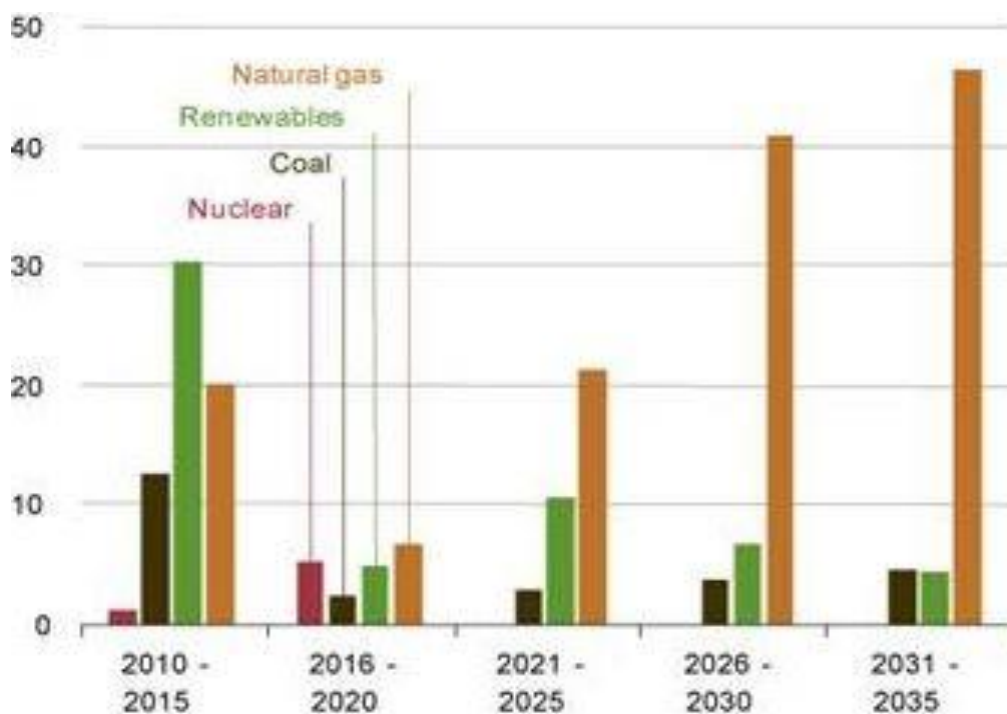
Η κύρια δύναμη που διαμορφώνει την ζήτηση για το φυσικό αέριο στον βιομηχανικό τομέα είναι η απομάκρυνση αυτού από τις ενεργειακά απαιτητικές διαδικασίες παραγωγής. Υπάρχουν δύο κινητήριες δυνάμεις πίσω από αυτή την αλλαγή: η αυξημένη ενεργειακή απόδοση του εξοπλισμού και των διαδικασιών στον βιομηχανικό τομέα αλλά και η στροφή προς την παραγωγή αγαθών που απαιτούν μικρότερη προσφορά ενέργειας. Αυτή η τάση αναμένεται να επικρατήσει στο μέλλον και είναι ο λόγος για την μέτριο βεληνεκούς αύξηση ζήτησης στον βιομηχανικό τομέα.

1.1.7.3 Ζήτηση τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται από την ΕΙΑ να αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 1% μέχρι το 2035. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η αυξανόμενη ζήτηση, η ΕΙΑ προβλέπει πως θα χρειαστούν 223 GW νέας ηλεκτρικής παραγωγικής ικανότητας μέχρι το 2035.

Εξαιτίας των σχετικά χαμηλών κεφαλαιακών απαιτήσεων για την οικοδόμηση εγκαταστάσεων συνδυασμένου κύκλου παραγωγής με χρήση φυσικού αερίου, αλλά και λόγω της μείωσης των εκπομπών που μπορούν να επιτευχθούν μέσω της χρήσης φυσικού αερίου σε σύγκριση με άλλα ορυκτά καύσιμα, η ΕΙΑ αναμένει πως το 60% της νέας ηλεκτρικής παραγωγικής ικανότητας που θα κατασκευαστεί μέχρι το 2035, θα είναι μέσω συνδυασμένου κύκλου(natural gas combined-cycle) ή παραγωγής μέσω καύσεων σε αεριοστρόβιλους με χρήση φυσικού αερίου(combustion turbine). Στο Σχήμα 1-8 φαίνεται η πρόβλεψη της ΕΙΑ για το τα GW ηλεκτρικής ενέργειας που θα

παράγονται από κάθε μορφή καυσίμου στις ΗΠΑ και φαίνεται ξεκάθαρα η αύξηση της χρήσης φυσικού αερίου.



Σχήμα 1-8: Ηλεκτρική παραγωγική ικανότητα που θα προστεθεί στο ενεργειακό μείγμα των ΗΠΑ 2010-2035(gigawatts)

(Πηγή: U.S. Energy Information Administration)

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η προβλεπόμενη παγκόσμια σταθερή άνοδος στις τάσεις της ζήτησης, της παραγωγής και του επιπέδου αποθεμάτων για το φυσικό αέριο θα μπορούσε να αυξηθεί καθώς η νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος και την αλλαγή του κλίματος, αυξάνει την ζήτηση για καύσιμα χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όπως το φυσικό αέριο(Oil & Gas Journal, 2014).

Ενώ οι προβλέψεις από διάφορες ομοσπονδιακές υπηρεσίες μπορεί να διαφέρουν στις ακριβείς προσδοκίες τους σχετικά με τις παγκόσμιες τάσεις φυσικού αερίου, ένα αποτέλεσμα είναι κοινό και επαναλαμβανόμενο ανάμεσα στις μελέτες: η κατανάλωση του φυσικού αερίου, η παραγωγή και τα αποθέματα θα συνεχίσουν να αυξάνονται για το προβλεπόμενο μέλλον.

1.2 Βελτιστοποίηση

1.2.1 Εισαγωγή στη Βελτιστοποίηση-Βασικές έννοιες

Η βελτιστοποίηση αποτελεί ένα εργαλείο που έχει ως σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης μέσα από ένα χώρο υποψήφιας λύσεων. Στο μοντέλο που δημιουργείται προς βελτιστοποίηση ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση (Objective Function), που καλείται να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί. Το προς επίλυση πρόβλημα μπορεί να είναι ενός στόχου (Single Objective Optimization-SOO) ή και περισσότερων (Multi Objective Optimization-MOO).

Οι μεταβλητές απόφασης ή μεταβλητές σχεδιασμού ορίζουν το σύνολο των τιμών από όπου προκύπτει η βέλτιστη λύση. Στην περίπτωση όπου το πρόβλημα τίθεται υπό περιορισμούς ισότητας ή ανισότητας (constrains), που μπορεί να αφορούν ορισμένες ή όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, η λύση πρέπει να τους ικανοποιεί. Προβλήματα βελτιστοποίησης συναντώνται σε πολλούς επιστημονικούς τομείς όπως π.χ. στα οικονομικά, στην ρομποτική, στον προγραμματισμό παραγωγής.

Γενικά, η μορφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ορίζεται μαθηματικά ως η εύρεση ενός διανύσματος:

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \vec{S}$$

Όπου, $\vec{S} = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n, S_i \subseteq IR, i = 1, \dots, n$

το οποίο ελαχιστοποιεί τις συναρτήσεις $\vec{f}(x)$

ή ισοδύναμα $f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_n(\vec{x})$,

ή ισοδύναμα $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Ικανοποιώντας τους περιορισμούς ανισότητας και ισότητας (όταν αυτοί υπάρχουν):

$$g_j(x) \leq 0, j = 0, 1, \dots, m$$

$$I_j(x) = 0, j = 0, 1, \dots, p$$

Ο παραπάνω ορισμός καλύπτει όλα τα πιθανά προβλήματα βελτιστοποίησης καθώς η ελαχιστοποίηση της $\vec{f}(x)$ ισοδυναμεί με την μεγιστοποίηση της $-\vec{f}(x)$.

Ο βασικός διαχωρισμός των προβλημάτων βελτιστοποίησης γίνεται σε συνεχή και διακριτά προβλήματα. Στα συνεχή προβλήματα οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι

πραγματικές μεταβλητές και ως επί το πλείστο συνοδεύονται με άνω και κάτω όρια. Οι συναρτήσεις στόχου και περιορισμών συνήθως είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες. Η αναζήτηση γίνεται σε απείρου πλήθους υποψήφιες λύσεις.

Στα διακριτά προβλήματα η αναζήτηση γίνεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό ακέραιων επιθυμητών λύσεων, αφού μια σύγκριση όλων των υποψήφιων λύσεων σε μεγάλα προβλήματα θα ήταν υπολογιστικά απαγορευτική. Πολλές φορές σε διακριτά προβλήματα χρησιμοποιούνται συνεχείς μέθοδοι βελτιστοποίησης, ορίζοντας την διακριτή μεταβλητή σαν συνεχή, στρογγυλοποιώντας την λύση στον πλησιέστερο ακέραιο. Παρ' όλα αυτά η εμπειρία έχει δείξει ότι τα αποτελέσματα αυτά μπορούν τελικά να απέχουν αρκετά από την βέλτιστη λύση.

1.2.2 Τοπική και ολική βελτιστοποίηση

Τα δυο αυτά είδη βελτιστοποίησης ορίζουν αν στο πρόβλημα, στόχος είναι η εύρεση μιας λύσης που να υπερτερεί στις γειτονικές της λύσεις, άρα είναι τοπικό ακρότατο (Local Optimum), ή αν αναζητείται η βέλτιστη λύση σε όλο το χώρο των αποδεκτών λύσεων, επομένως είναι ολικό ή καθολικό ακρότατο (Global Optimum). Επιθυμητή είναι πάντα η εύρεση του ολικού ακρότατου που πολλές φορές η εξασφάλισή του αποδεικνύεται επίπονη. Στον ορισμό μιας λύσης ως ολικό ακρότατο απαιτείται επιφύλαξη καθώς πολλοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης εγκλωβίζονται συχνά σε τοπικά ακρότατα, οπότε γενικά συνιστάται η χρήση του αλγορίθμου αρκετές φορές και από διαφορετικές αρχικοποιήσεις (Initial Point). Παρακάτω παρατίθεται μια σύντομη αναφορά στην θεωρία των ακροτάτων.

1.2.2.1 Ολικό Ελάχιστο

Το \vec{x}^* ονομάζεται διάνυσμα ολικού ελαχίστου (Global minimizer) της $f(\vec{x})$ και η $f(\vec{x}^*)$ ολικό ελάχιστο (Global optimum) αν για κάθε \vec{x} ισχύει $f(\vec{x}^*) \leq f(\vec{x})$.

1.2.2.2 Τοπικό Ελάχιστο

Το \vec{x}^* ονομάζεται διάνυσμα τοπικού ελαχίστου (Local minimizer) της $f(\vec{x})$ και η $f(\vec{x}^*)$ τοπικό ελάχιστο (Local optimum) αν για κάθε \vec{x} ισχύει $f(\vec{x}^*) \leq f(\vec{x})$ στην γειτονιά-περιοχή του \vec{x}^* .

1.2.3 Κατηγοριοποίηση μεθόδων Βελτιστοποίησης

Μια από τις πιο συνήθεις κατηγοριοποιήσεις των μεθόδων βελτιστοποίησης είναι βάσει των μεταβλητών σχεδιασμού, ακέραιες ή συνεχείς, αλλά και του είδους των εξισώσεων, γραμμικές ή μη γραμμικές, και είναι η ακόλουθη:

- Γραμμικός προγραμματισμός (Linear Programming-LP)
- Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (Mixed Integer Linear Programming-MILP)
- Μη γραμμικός προγραμματισμός (Non Linear Programming-NLP)
- Μεικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός (Mixed Integer non Linear Programming-MINLP)

Μια άλλη κατηγοριοποίηση που βασίζεται στην μέθοδο βελτιστοποίησης, αντί στο είδος του προβλήματος ως προς βελτιστοποίηση, είναι η διάκριση σε στοχαστικές και αιτιοκρατικές μεθόδους. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι (derivative methods) βασίζονται στην παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία είτε υπολογίζεται είτε προσεγγίζεται, σε αντίθεση με τις στοχαστικές μεθόδους που χρησιμοποιούν στοιχεία τυχαίας ή οργανωμένης τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης (non derivative methods).

Συνοπτικά, οι αιτιοκρατικές μέθοδοι έχουν ταχύτερο ρυθμό σύγκλισης αλλά προσαρμόζονται δυσκολότερα σε πολύπλοκα προβλήματα καθώς απαιτούν εκ νέου προγραμματισμό με κάθε αλλαγή στο πρόβλημα και απαιτούν υψηλότερο μαθηματικό υπόβαθρο συγκριτικά με τις στοχαστικές μεθόδους. Τέλος, χρήζουν προσοχής καθώς υπάρχει ο κίνδυνος εγκλωβισμού σε τοπικό βέλτιστο που εξαρτάται από το σημείο εκκίνησης.

Αντίθετα, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι πιο ευέλικτοι ως προς την προσαρμογή τους σε διαφορετικά προβλήματα, είναι πιο ανεξάρτητοι ως προς την αρχικοποίηση τους αλλά υστερούν ως προς την ταχύτητα σύγκλισης.

Μια τελευταία κατηγοριοποίηση που βασίζεται στην φύση του προβλήματος, είναι η βελτιστοποίηση με ή χωρίς περιορισμούς.

Το πρόβλημα που θα περιγραφεί στην παρούσα μελέτη, αποτελεί πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού και για αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί αυτή η κατηγορία προβλημάτων περαιτέρω.

1.2.4 Μεικτός ακέραιος προγραμματισμός

Η γενική μορφή των προβλημάτων μεικτού ακέραιου προγραμματισμού είναι:

$$\begin{aligned} & \min_{x,y} f(x,y) \\ \text{s.t.} \quad & h(x,y) = 0 \\ & g(x,y) \leq 0 \\ & x \in \mathfrak{R}^n \\ & y \in \{0,1\}^q \end{aligned}$$

Το διάνυσμα των μεταβλητών x αντιπροσωπεύει τις συνεχείς αποφάσεις (ρυθμοί ροής, πιέσεις κλπ.) ενώ το διάνυσμα των y μεταβλητών αντιπροσωπεύει την ύπαρξη ή όχι μίας πχ συσκευής. Τα παραπάνω γενικά προβλήματα είναι γνωστά ως MINLP (Mixed-Integer Non-Linear Programs) – προβλήματα μεικτού ακέραιου μη-γραμμικού προγραμματισμού, όταν τουλάχιστον μια συνάρτηση είναι μη-γραμμική. Ονομάζονται MILP (Mixed-Integer Linear Programs), όταν όλες οι συναρτήσεις είναι γραμμικές.

1.2.5 Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Το έργο του Δαρβίνου “On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life”, αποτελεί την έμπνευση μιας σειράς μεθόδων βελτιστοποίησης, των Εξελικτικών Αλγορίθμων (ΕΑ). Γενικά, ο Δαρβίνος με την θεωρία του ανέλυσε πως τα άτομα ενός πληθυσμού συναγωνίζονται για την επιβίωση τους, τόσο για την απόκτηση πόρων όσο και για την προσέλκυση συντρόφου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα επιτυχημένα άτομα να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα αναπαραγωγής και επιβίωσης, άρα και διαιώνισης των χαρακτηριστικών τους, των γονιδίων τους.

Με την πάροδο του χρόνου, των γενεών, αυτοί που έχουν προσαρμοστεί καλύτερα επιβιώνουν και τα χαρακτηριστικά τους μεταβιβάζονται σε περισσότερους απογόνους, όπου ο συνδυασμός των καλών αυτών χαρακτηριστικών μπορεί να αποφέρει απογόνους με χαρακτηριστικά καλύτερα από αυτά των γονέων. Με τον φυσικό μηχανισμό αυτό τα είδη, οι πληθυσμοί εξελίσσονται και επιβιώνουν στο εκάστοτε περιβάλλον.

Ένα πλήθος επιστημόνων του χώρου των ηλεκτρονικών υπολογιστών μελέτησαν αυτά τα εξελικτικά συστήματα της φύσης, με την προσδοκία ότι υπολογιστικά προβλήματα στο χώρο της μηχανικής θα μπορούσαν να επιλυθούν με διαδικασίες που θα ακολουθούσαν την λογική της φυσικής εξέλιξης. Οι ΕΑ όμως δεν είναι καινούριοι μέθοδοι. Προτάθηκαν το 1960 αλλά με την γεωμετρική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και την μείωση του κόστους των γρήγορων και ισχυρών υπολογιστών, οι στοχαστικές μέθοδοι απέσπασαν ιδιαίτερο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον αλλά και αποδοχή κατά την δεκαετία του 1990, με κυριότερο εκπρόσωπο τούς τους ΕΑ (Goldberg, 1989).

Κύριοι εκπρόσωποι των ΕΑ είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA), ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (EP) και οι Εξελικτικές Στρατηγικές (ES). Κάθε ένας από τους πιο πάνω έχει τα δικά του διακριτά γνωρίσματα, αν και οι σύγχρονοι μέθοδοι αλληλοδανείζονται στοιχεία ανάλογα με την καταλληλότητα τους σε κάθε πρόβλημα.

Οι ΕΑ διαθέτουν ένα σύνολο από υποψήφιες λύσεις του προβλήματος, τον πληθυσμό, που εξελίσσεται χρησιμοποιώντας μηχανισμούς παρμένους από την φύση, όπως διασταύρωση (recombination), μετάλλαξη (mutation) και επιλογή (selection). Στην γενική της μορφή, μια μέθοδος βελτιστοποίησης ονομάζεται ΕΑ όταν χρησιμοποιεί πληθυσμούς ατόμων που εξελίσσονται από γενιά σε γενιά, αντί μεμονωμένων ατόμων, στους οποίους εμφανίζονται νέα άτομα ή εξαφανίζονται παλαιότερα με κριτήριο την απόδοσή τους. Επίσης, από γενιά σε γενιά, επανάληψη σε επανάληψη, υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών από τους γονείς στους απογόνους αλλά και εμφάνιση καινούριων από στοχαστικά μέσα που χρησιμοποιούνται. Η καταλληλότητα τους καθορίζεται από την απόδοσή τους ως προς την εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση (Joines and Houck, 1994).

1.2.5.1 Πλεονεκτήματα των Εξελικτικών Αλγορίθμων

Οι ΕΑ έχουν περιορισμένες απαιτήσεις ως προς τη φύση του προβλήματος, που πρακτικά σημαίνει πως σε ένα πρόβλημα η χρήση τους είναι σχεδόν άμεση σε αντίθεση με τις αιτιοκρατικές μεθόδους που θα απαιτούσαν παρεμβάσεις στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Επίσης, οι περισσότερες από τις συμβατικές μεθόδους εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων και πλεονεκτούν ως προς την ταχύτητα σύγκλισης, ενώ οι ΕΑ εφαρμόζονται σε όλα τα προβλήματα και η ταχύτητα σύγκλισης δεν επηρεάζεται σημαντικά από το πρόβλημα. Γενικά, οι ΕΑ απαιτούν μόνο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για να εφαρμοστούν, δεν απαιτούν πληροφορία για τις παραγώγους της, και μαζί με την ευκολία και απλότητα υλοποίησης τους στον ηλεκτρονικό υπολογιστή τους καθιστά δημοφιλή σε πολύπλοκα

προβλήματα, και ιδιαίτερα σε προβλήματα, όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι μη παραγωγίσιμη, υπάρχουν ασυνέχειες, έντονη μη-γραμμικότητα ή υπάρχουν πολλά τοπικά ακρότατα. Στις περιπτώσεις αυτές οι κλασσικές μέθοδοι έχουν δείξει να αποτυγχάνουν, καθώς στην περίπτωση της ασυνέχειας η επίλυση καθίσταται δυσχερή έως αδύνατη, ενώ στην περίπτωση των πολλών τοπικών ακροτάτων συγκλίνουν σε ένα από αυτά το οποίο εξαρτάται και σε μεγάλο βαθμό από το σημείο εκκίνησης της αναζήτησης (Runarsson and Yiao, 2002).

1.2.5.2 Τρόπος λειτουργίας των Εξελικτικών Αλγορίθμων

Ο αλγόριθμος ξεκινά με την τυχαία αρχικοποίηση του πληθυσμού, που είναι η πρώτη γενιά, και η οποία αξιολογείται από την αντικειμενική συνάρτηση του εκάστοτε προβλήματος. Στην συνέχεια, με την είσοδο στον επαναληπτικό κύκλο, εφαρμόζονται οι μηχανισμοί διασταύρωσης και μετάλλαξης από όπου προκύπτουν τα νέα άτομα του πληθυσμού, η νέα γενιά. Στην συνέχεια, ανάλογα με την διαδικασία επιλογής που έχει προκαθοριστεί, προκρίνονται στην επόμενη γενιά οι απόγονοι που έχουν κριθεί ως πιο κατάλληλοι. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού που μπορεί να είναι η επίτευξη ενός αριθμού επαναλήψεων, η ανάλωση του υπολογιστικού χρόνου που επέτρεψε ο χρήστης, η επίτευξη μιας τιμής-στόχου, η ομογενοποίηση του πληθυσμού ή η μη περεταίρω βελτίωση της λύσης για ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων (stagnation).

1.2.6 Optimization toolbox Matlab

Το Optimization Toolbox της Matlab παρέχει συναρτήσεις για την εύρεση παραμέτρων που ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν αντικειμενικές συναρτήσεις ενώ παράλληλα ικανοποιούν τυχόν περιορισμούς. Η εργαλειοθήκη αυτή περιλαμβάνει λύτες (solvers) για:

- Γραμμικό προγραμματισμό
- Μεικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό
- Τετραγωνικό προγραμματισμό
- Μη γραμμικό προγραμματισμό
- Μη γραμμικό προγραμματισμό με χρήση ελαχίστων τετραγώνων

Οι λύτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρεθούν βέλτιστες λύσεις σε συνεχή και διακριτά προβλήματα, να εκτελεστούν αναλύσεις αλλά και για να ενσωματωθούν μέθοδοι βελτιστοποίησης σε αλγόριθμους και εφαρμογές (MathWorks, 2017).

1.2.7 Η συνάρτηση *ga* της Matlab

Το optimization toolbox της Matlab περιλαμβάνει και την συνάρτηση *ga*. Η *ga* αποτελεί έναν solver γενετικού αλγορίθμου που είναι σε θέση να παρέχει βελτιστοποίηση σε προβλήματα μεικτού ακεραίου προγραμματισμού ή και συνεχών μεταβλητών, με ή χωρίς περιορισμούς (MathWorks, 2017).

Η συνάρτηση αυτή έχει σύνταξη:

$$[x, fval, exitflag, output, population, scores] = ga(fitnessfcn, nvars, A, b, Aeq, beq, LB, UB, nonlcon, Intcon, options)$$

όπου στον Πίνακα 1-1 περιγράφονται τα βασικά ορίσματα της:

Πίνακας 1-1: Βασικά Ορίσματα συνάρτησης *ga*.

x	Το καλύτερο σημείο-λύση που έχει εντοπίσει η <i>ga</i> κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων.
fval	Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην θέση <i>x</i> .
exitflag	Ακέραιος αριθμός που δίνει τον λόγο που η <i>ga</i> σταμάτησε να πραγματοποιεί επαναλήψεις(πχ έφτασε στον μέγιστο αριθμό γενεών).
output	Πίνακας που περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία του αλγορίθμου.
population	Πίνακας του οποίου οι γραμμές περιλαμβάνουν τα μέλη του τελικού πληθυσμού
scores	Διάνυσμα στήλη των επιδόσεων στην αντικειμενική συνάρτηση για τα μέλη του τελικού πληθυσμού

fitnessfcn	Είναι η αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση που δίνεται στον αλγόριθμο μέσω ενός αρχείου <i>m</i> . Η αντικειμενική συνάρτηση δέχεται ένα διάνυσμα γραμμή με μέγεθος <i>nvars</i> και επιστρέφει μία τιμή.
nvars	Είναι θετικός ακέραιος που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των μεταβλητών στο πρόβλημα.
A	Πίνακας για γραμμικούς περιορισμούς ανισότητας της μορφής $Ax \leq b$. Εάν το πρόβλημα έχει <i>m</i> γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς και <i>n</i> μεταβλητές τότε το <i>A</i> είναι πίνακας μεγέθους $m \times n$.
b	Διάνυσμα για γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς της μορφής $Ax \leq b$. Εάν το πρόβλημα έχει <i>m</i> γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς και <i>n</i> μεταβλητές τότε το <i>b</i> είναι διάνυσμα μεγέθους <i>m</i> .
Aeq	Πίνακας για γραμμικούς ισοτικούς περιορισμούς της μορφής $Aeqx = beq$. Εάν το πρόβλημα έχει <i>m</i> γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς και <i>n</i> μεταβλητές τότε το <i>Aeq</i> είναι πίνακας μεγέθους $m \times n$.
beq	Διάνυσμα για γραμμικούς ισοτικούς περιορισμούς της μορφής $Aeqx = beq$. Εάν το πρόβλημα έχει <i>m</i> γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς και <i>n</i> μεταβλητές τότε το <i>beq</i> είναι διάνυσμα μεγέθους <i>m</i> .
LB	Διάνυσμα για τα κάτω όρια των τιμών του <i>x</i> .
UB	Διάνυσμα για τα άνω όρια των τιμών του <i>x</i> .
nonlcon	Είναι οι μη γραμμικοί ανισοτικοί περιορισμοί που εισάγονται με την μορφή αρχείου <i>m</i> που περιλαμβάνει $[c, ceq] = nonlcon(x)$. Η <i>ga</i> προσπαθεί να επιτύχει $c \leq 0, ceq = 0$ όπου <i>c</i> , <i>ceq</i> είναι διανύσματα γραμμή που έχουν πολλούς περιορισμούς.
Intcon	Διάνυσμα των ακέραιων μεταβλητών.
options	Επιλογές Βελτιστοποίησης, που περιλαμβάνουν διάφορες δυνατότητες όπως την επιλογή επαναλήψεων ή των <i>max</i> αριθμό γενεών.

1.2.8 Βελτιστοποίηση στον τομέα του φυσικού αερίου

Η μεγάλη υπολογιστική δυνατότητα που δίνει στους μηχανικούς η βελτιστοποίηση, δεν θα μπορούσε παρά να αξιοποιηθεί και στον τομέα της επιστήμης του φυσικού αερίου, το οποίο έχει πολλούς παράγοντες και λειτουργίες, που απαιτούν συνεχή και δυναμική βελτιστοποίηση με απώτερο, βέβαια σκοπό τόσο το κέρδος όσο και την προστασία του περιβάλλοντος (Rahim end Li, 2015). Οι σημαντικότερες, ίσως, λειτουργίες που αξιοποιούν μοντέλα βελτιστοποίησης στον τομέα του φυσικού αερίου είναι οι εξής:

1.2.8.1 Βελτιστοποίηση στην Παραγωγή φυσικού αερίου(Recovery)

Μοντέλα και τεχνικές βελτιστοποίησης εφαρμόζονται εκτενώς στις διαδικασίες ανάκτησης του φυσικού αερίου, όπως ο προγραμματισμός της παραγωγής, η τοποθέτηση της κεφαλής της πηγής(well head), τα συστήματα ανάκτησης αερίου ή τα σχέδια των εγκαταστάσεων. Αυτά τα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι υπολογιστικά δύσκολο να λυθούν. Ένας λόγος είναι ότι ένας τεράστιος αριθμός παραμέτρων υπόκειται σε αβεβαιότητα. Ένας άλλος λόγος είναι οι μη γραμμικές/μη ομαλές/μη συνεκτικές συναρτήσεις και περιορισμοί, λόγω των ιδιοτήτων των λειτουργιών παραγωγής φυσικού αερίου (Arianson, 2008).

1.2.8.2 Βελτιστοποίηση δικτύου αγωγών φυσικού αερίου

Οι αγωγοί φυσικού αερίου διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στην παροχή ενέργειας και στην ασφάλεια αυτής. Τα κράτη ηγέτες στην παραγωγή και διανομή φυσικού αερίου συνεχώς επενδύουν τεράστια κεφάλαια με σκοπό την αναβάθμιση αυτών των αγωγών και έχουν πραγματοποιήσει τεράστιο αριθμό ερευνών πάνω σε εφαρμογές βελτιστοποίησης στα δίκτυα αγωγών. Η βέλτιστη διάμετρος των αγωγών, η τοποθέτηση σταθμών συμπίεσης ενδιάμεσα των αγωγών, καθώς και η ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου στο δίκτυο είναι μόνο μερικά από τα προβλήματα που εφαρμόζονται τεχνικές βελτιστοποίησης με σημαντικά αποτελέσματα και οφέλη (Rios-Mercado and Borraz-Sanchez, 2015).

1.2.8.3 Βελτιστοποίηση αγοράς φυσικού αερίου

Οι κυβερνητικές ρυθμίσεις σχετικά με τη βιομηχανία φυσικού αερίου χρονολογούνται από τις αρχές της χρήσης του φυσικού αερίου. Με μια πρώτη σκέψη αυτό έμοιαζε λογικό καθώς η κυβέρνηση και το δημόσιο είναι οι κύριοι χρήστες του φυσικού αερίου και οι επενδύσεις στην βιομηχανία του φυσικού αερίου είναι τεράστιες. Από το 1980 όμως άρχισε η απορρύθμιση της αγοράς, με σκοπό την βελτίωση τόσο της ισότητας όσο και της αποδοτικότητας της αγοράς του φυσικού αερίου (Bangerth et al., 2006).

Ανάμεσα στους αρχικούς παραγωγούς και τους τελικούς χρήστες μεσολαβεί μια ποικιλία συμμετεχόντων, κάθε μία από τις οποίες ενεργεί για να βελτιστοποιήσει τα δικά της οφέλη. Κάτω από διάφορες κυβερνητικές πολιτικές, οι διάφοροι "παίκτες" της αγοράς αποσκοπούν σε διαφορετικά μοντέλα βελτιστοποίησης που μπορεί να περιλαμβάνουν την βελτιστοποίηση των σχέσεων μεταξύ παραγωγών και διανομέων ή και την απόφαση επένδυσης σε νέες αγορές.

1.3 Το πρόβλημα

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η βελτιστοποίηση της διαδικασίας άντλησης φυσικού αερίου μέσω ενός επιλύτη γενετικού αλγορίθμου και συγκεκριμένα του ga της Matlab. Η μοντελοποίηση του προβλήματος πραγματοποιείται εισάγοντας εξίσωση μεγιστοποίησης κέρδους με περιορισμούς που αναφέρονται :

- Στην κάλυψη της ζήτησης
- Στην πτώση πίεσης λόγω άντλησης στα διάφορα πηγάδια
- Στην επιλογή των πηγαδιών που αντλούν κάθε χρονική περίοδο

Μελετάται ο ρόλος και η επίδραση κάθε περιορισμού και συντελεστή στο τελικό κέρδος με σκοπό τον βέλτιστο προγραμματισμό της παραγωγής. Αποτελεί ένα πρόβλημα που έχουν να αντιμετωπίσουν σε καθημερινή βάση οι εταιρείες και οι διαχειριστές των δεξαμενών φυσικού αερίου και που είναι σε θέση να δώσει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην αγορά.

2 Μαθηματικό μοντέλο

2.1 Πίνακας Συμβόλων

Προτού ξεκινήσει η ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου για το πρόβλημα που απασχολεί την παρούσα μελέτη κρίνεται σκόπιμη η παράθεση του Πίνακα Συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν. Στον Πίνακα 2-1 ,λοιπόν, παρουσιάζονται τα σύμβολα του προβλήματος καθώς και οι μονάδες μέτρησής τους.

Πίνακας 2-1: Πίνακας Συμβόλων Μαθηματικού μοντέλου.

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
b_i^k	Οικονομικό όφελος από μια μονάδα ροής φυσικού αερίου	\$/ ft ³
q_i^k	Ρυθμός ροής φυσικού αερίου στο πηγάδι i κατά τη χρονική περίοδο k	ft ³ /day
Φ_{ij}^k	Μητρώο εξίσωσης επιρροής του πηγαδιού j στο πηγάδι i για τη χρονική περίοδο k	Αδιάστατο
p_i^k	Πτώση πίεσης στο πηγάδι i κατά τη χρονική περίοδο k	psia
p_i^{-k}	Μέγιστη πτώση πίεσης στο πηγάδι i κατά τη χρονική περίοδο k	psia
\hat{p}_i^l	Μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση πίεσης στο πηγάδι i από το αρχικό χρονικό σημείο μέχρι και την χρονική περίοδο l	psia

d^k	Ζήτηση κατά τη χρονική περίοδο k	ft ³ /day
M_i	Ένας μεγάλος αριθμός που περιορίζει τον ρυθμό ροής εάν το πηγάδι i αντλείται.	Αδιάστατο
y_i	Δυαδική μεταβλητή απόφασης που ορίζει εάν το πηγάδι i αντλείται ή όχι	0 ή 1
t_D	Αδιάστατος χρόνος	Αδιάστατο
\bar{P}	Μέση πίεση ανάμεσα στην αρχική πίεση στο πηγάδι P_o και στην πίεση ύστερα από την επίδραση της παραγωγής P_w	psia
φ	Πορώδες	Αδιάστατο
μ	Ιξώδες αερίου	cp
k	Διαπερατότητα	md
r_w	Ακτίνα πηγαδιού	ft
t	Χρόνος	hrs ή days
$r_{l,m}$	Το διάστημα μεταξύ δύο πηγαδιών l,m	Αδιάστατο
$d_{i,j}$	Απόσταση μεταξύ των πηγαδιών i και j	miles

2.2 Εισαγωγή

Συνήθως, μια δεξαμενή φυσικού αερίου καθίσταται προσβάσιμη μέσω διάνοιξης πολλαπλών πηγαδιών(wells) στην επιφάνειά της. Η άντληση αερίου από οποιαδήποτε από τα παραπάνω πηγάδια οδηγεί σε πτώση πίεσης σε όλα τα υπόλοιπα πηγάδια που αντλούν στην ίδια δεξαμενή. Έπειτα, η πτώση πίεσης που προκλήθηκε σε μία πηγή, θα επηρεάσει και θα μειώσει τον ρυθμό άντλησης(withdrawal rate) σε κάθε πηγάδι για την επόμενη χρονική περίοδο. Το πρόβλημα βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής αποτελεί η διαδικασία για να βρεθεί ο βέλτιστος ρυθμός άντλησης σε κάθε πηγάδι που αντλεί, για κάθε χρονική περίοδο (Nasrabaldi et al., 2012).

Το ζήτημα αυτό διατυπώνεται ως πρόβλημα Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Murray and Edgar, 1978). Στο πρόβλημα αυτό, γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστούν οι βέλτιστοι ρυθμοί άντλησης σε κάθε πηγάδι ενώ ταυτόχρονα ικανοποιείται το χρονοδιάγραμμα της ζήτησης χωρίς να υπερβαίνεται. Η διάνοιξη ή μη πηγαδιού σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία i , μπορεί να συμβολιστεί με μία δυαδική μεταβλητή y_i . Ως εκ τούτου, η απόφαση γεώτρησης και εγκατάστασης πηγαδιού μπορεί να παρθεί μόνο σε συγκεκριμένες-καθορισμένες θέσεις i που πρέπει να προσδιοριστούν εκ των προτέρων. Παράλληλα, χρησιμοποιείται ο συμβολισμός q_i^k για να δηλωθεί ο ρυθμός άντλησης από το πηγάδι i κατά τη χρονική περίοδο k .

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των ρυθμών άντλησης και των πιέσεων σε όλα τα πηγάδια μπορεί να οριστεί μέσω της ακόλουθης εξίσωσης ροής αερίου,

$$\nabla k_g \nabla \Phi + q = \varphi c_t \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.1.1)$$

όπου
$$\Phi = 2 \int_0^p \frac{\rho}{z(\rho)\mu(\rho)} d\rho. \quad (2.1.2)$$

Το να συμπεριληφθεί, όμως, αυτός ο περιορισμός σε ένα μαθηματικό, προγραμματιστικό μοντέλο οδηγεί σε τεράστιες υπολογιστικές δυσκολίες. Ωστόσο, αυτός ο μη γραμμικός περιορισμός έχει ένα πολύ καλό γραμμικό υποκατάστατο, που ονομάζεται εξισώσεις επιρροής(influence equations) (Wattenbarger, 1970). Σε αυτές τις εξισώσεις, η πτώση πίεσης στο πηγάδι i είναι γραμμική συνάρτηση των ρυθμών άντλησης από όλα τα πηγάδια που αντλούν στην ίδια δεξαμενή. Αυτό ορίζεται μέσω μητρώων εξισώσεων επιρροής, Φ^k , $k=1, \dots, m$ όπου Φ_{ij} συμβολίζει την πτώση πίεσης στο πηγάδι i για μία μονάδα ροής στο πηγάδι j κατά τη διάρκεια της χρονική περιόδου k . Το πρόβλημα, λοιπόν, μέγιστου κέρδους μπορεί να μοντελοποιηθεί πλέον ως εξής:

2.3 Αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί

2.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Στην μαθηματική μοντελοποίηση που εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη, περιγράφεται το φαινόμενο την άντλησης φυσικού αερίου από μια δεξαμενή μέσω πολλαπλών πηγαδιών, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη δυνατότητα να μεγιστοποιεί το συνολικό κέρδος από την άντληση φυσικού αερίου σε όλα τα πηγάδια, για όλες τις χρονικές περιόδους.

Αντικειμενική Συνάρτηση προς βελτιστοποίηση,

$$\max \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n b_i^k q_i^k \quad (2.2.1)$$

Περιορισμοί,

$$\sum_{j=1}^n \Phi_{ij}^k q_j^k = p_i^k, \quad i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m, \quad (2.2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n \Phi_{ij}^k q_j^k \leq p_i^{-k}, \quad i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m, \quad (2.2.3)$$

$$\sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n \Phi_{ij}^k q_j^k \leq \hat{p}_i^l, \quad i = 1, \dots, n, l = 1, \dots, m, \quad (2.2.4)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j^k \leq d^k, \quad k = 1, \dots, m, \quad (2.2.5)$$

$$q_i^k \leq M_i y_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.2.6)$$

$$q_i^k \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m, \quad (2.2.7)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.2.8)$$

όπου, για το πηγάδι i κατά τη χρονική περίοδο k ,

- b_i^k είναι το οικονομικό όφελος από μια μονάδα ροής αερίου
- p_i^k είναι η πτώση πίεσης

- p_i^{-k} είναι η μέγιστη πτώση πίεσης κατά την περίοδο k
- \hat{p}_i^l είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση πίεσης από το αρχικό χρονικό σημείο μέχρι και την περίοδο l
- d^k είναι η ζήτηση την χρονική στιγμή k
- M_i είναι ένας μεγάλος αριθμός που περιορίζει τον ρυθμό άντλησης εάν $y_i = 1$

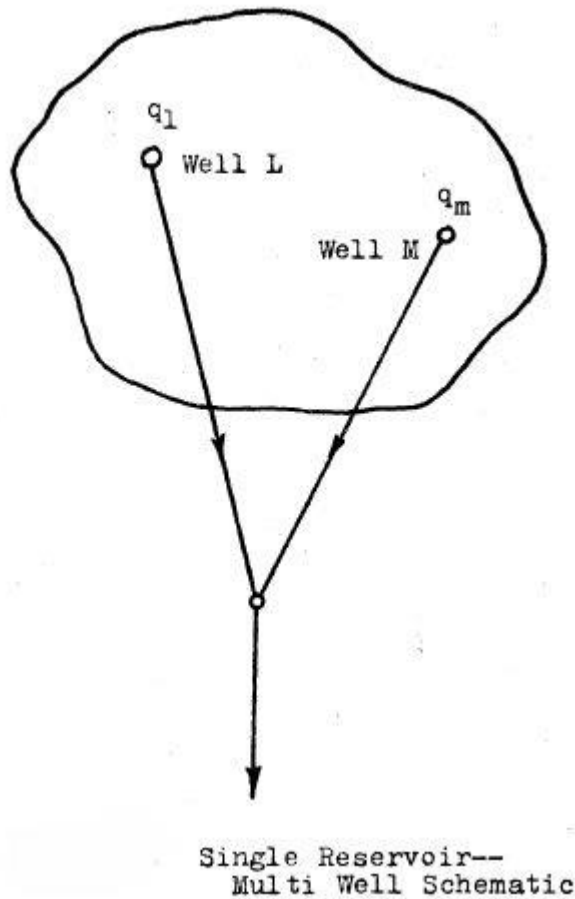
2.3.2 Επεξήγηση περιορισμών

- Οι περιορισμοί (2.2.2) υπολογίζουν την πτώση πίεσης σε κάθε πηγάδι κατά τη διάρκεια κάθε χρονικής περιόδου.
- Οι περιορισμοί (2.2.3) ορίζουν το άνω όριο από το οποίο η πίεση μπορεί να πέσει κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου για κάθε πηγάδι.
- Οι περιορισμοί (2.2.4) ορίζουν το άνω όριο από το οποίο η πίεση μπορεί να πέσει από το αρχικό χρονικό σημείο ως την εκάστοτε χρονική περίοδο.
- Οι περιορισμοί (2.2.5) εξασφαλίζουν ότι η συνολική άντληση από όλα τα πηγάδια δεν ξεπερνάει τη ζήτηση σε κάθε χρονική περίοδο.
- Οι περιορισμοί (2.2.6) ορίζουν πως μόνο τα ενεργά πηγάδια μπορούν να έχουν θετικό ρυθμό άντλησης.

2.4 Εξισώσεις επιρροής

Κατά τη διάρκεια της άντλησης φυσικού αερίου μέσω πολλαπλών πηγαδιών, υπάρχει δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των ρυθμών άντλησης στα διάφορα πηγάδια και των πιέσεων στα πηγάδια αυτά λόγω της πτώσης πίεσης που προκαλείται μέσω της ροής αερίου. Τον συνδυαστικό κρίκο ανάμεσα σε αυτά τα δύο μεγέθη διαδραματίζουν οι εξισώσεις επιρροής (influence functions).

Στο Σχήμα 2-1 απεικονίζεται μία δεξαμενή φυσικού αερίου με δύο πηγάδια l και m . Εφόσον η πτώση πίεσης στο ένα πηγάδι επηρεάζεται από την παραγωγή στο άλλο πηγάδι, εισάγεται μια γενικευμένη εξίσωση επιρροής ώστε να περιγράψει αυτή την αλληλεπίδραση (Hummer, 1968).



Σχήμα 2-1: Δεξαμενή Φυσικού αερίου με δύο πηγάδια

(Πηγή: Oil & Gas Journal)

Η γενικευμένη αυτή εξίσωση επιρροής είναι της μορφής:

$$p_l^k = \Phi_{lm}^k q_m^k \quad (2.3.1)$$

όπου,

- p_l^k είναι η πτώση πίεσης στην πηγή l λόγω άντλησης στο πηγάδι m κατά την χρονική περίοδο k.
- Φ_{lm}^k είναι το μητρώο της εξίσωσης επιρροής. Για την χρονική περίοδο k εκφράζει την μερική πίεση στο πηγάδι l λόγω συνεχούς ροής στο πηγάδι m.
- q_m^k είναι ο ρυθμός ροής του πηγαδιού m για τη χρονική περίοδο k.

Προκειμένου να δοθεί η σχέση που υπολογίζει το μητρώο εξίσωσης επιρροής πρέπει πρώτα να εξηγηθεί η έννοια του αδιάστατου χρόνου t_D .

2.4.1 Αδιάστατος χρόνος t_D

Ο αδιάστατος χρόνος, t_D , περιγράφει το πώς αλλάζει η πίεση στο πηγάδι κατά τη διάρκεια του χρόνου όταν ο ρυθμός ροής αλλάξει απότομα από το 0 σε ένα σταθερό ρυθμό, q (Chaudry, 2003). Μαθηματικά, ο t_D ορίζεται ως:

$$t_D = \frac{0,00633 k \bar{P} t(days)}{\mu \phi r_w} = \frac{0,000264 k \bar{P} t(hrs)}{\mu \phi r_w} \quad (2.3.1.1)$$

όπου,

\bar{P} = μέση πίεση (psia) ανάμεσα σε αρχική πίεση στο πηγάδι P_o και πίεση ύστερα από την επίδραση της παραγωγής P_w .

ϕ =πορώδες (fraction porosity)

μ = ιξώδες αερίου (cp)

k = διαπερατότητα (md)

r_w =ακτίνα πηγαδιού (ft)

t = χρόνος(hrs ή days)

2.4.2 Μοντέλο μητρώου εξισώσεων επιρροής

Έχοντας δώσει τον ορισμό του αδιάστατου χρόνου, ακόλουθο είναι να δοθεί και το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού των μητρώων εξισώσεων επιρροής που προσεγγίζεται ως (Hummer, 1968):

$$\Phi_{lm}^k = \frac{1}{2} \left[\ln \frac{4t}{r_{l,m}^2} - 0.57722 \right] \quad (2.3.2.1)$$

για $\frac{4t}{r_{l,m}^2} \geq 2000$ (2.3.2.2)

όπου:

$r_{l,m}$ = το διάστημα μεταξύ δύο πηγαδιών l,m που ορίζεται από τον λόγο:

$$\frac{\text{απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο πηγαδιών}}{\text{ακτίνα άντλησης πηγαδιού}}$$

Αυτή η προσέγγιση είναι σε θέση να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μία άπειρη δεξαμενή φυσικού αερίου με σταθερή πίεση P_0 .

2.5 Μειονεκτήματα μοντέλου

Παρόλο που το παραπάνω μοντέλο είναι ικανό να δώσει χρήσιμα αποτελέσματα και να συνδράμει δυναμικά στην βελτιστοποίηση της ανάκτησης του φυσικού αερίου, έχει και κάποια μειονεκτήματα (Zheng et al., 2010).

- Το μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνει κανένα άλλο κόστος όπως το κόστος γεώτρησης
- Δεν λαμβάνει υπόψιν την σχέση μεταξύ του συντελεστή οφέλους b_i^k και της ζήτησης d^k και υποθέτει πως ο χειριστής μπορεί να επιλέξει όποιο ρυθμό ροής θέλει χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την παράλληλη πίεσης κεφαλής πηγαδιού (concurrent wellhead pressure).
- Επίσης, έπειτα από την απελευθέρωση της αγοράς του φυσικού αερίου, ο περιορισμός (2.2.5) δεν είναι απαραίτητος και μπορεί να απορροφηθεί στην αντικειμενική συνάρτηση.
- Τέλος, οι διαφορετικές χρονικές περίοδοι είναι αλληλένδετες μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει πως η τιμή του φυσικού αερίου στην χρονική περίοδο t θα επηρεάσει τη ζήτηση στην επόμενη χρονική περίοδο $t+1$, γεγονός που δεν μελετάται από το παρών μοντέλο.

3 Υπολογιστικό μοντέλο

3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα που αναλύθηκε στο μαθηματικό μοντέλο και αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε να δοκιμασθεί και να λυθεί μέσω του περιβάλλοντος της Matlab. Ο λόγος είναι ότι η Matlab αποτελεί ένα δυνατό και ταυτόχρονα φιλικό προς τον χρήστη μαθηματικό εργαλείο και παράλληλα διαθέτει στις βιβλιοθήκες της πολλές συναρτήσεις που εξειδικεύονται στην βελτιστοποίηση.

Επιλέχθηκε η συνάρτηση ga της Matlab για την λύση του προβλήματος. Ο γενετικός αλγόριθμος της Matlab δίνει την δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων μεικτού ακέрайου προγραμματισμού, όπως το πρόβλημα που απασχολεί την παρούσα εργασία αλλά και έχει και το πλεονέκτημα να δίνει γρήγορα αποτελέσματα ακόμα και με μεγάλο αριθμό μεταβλητών.

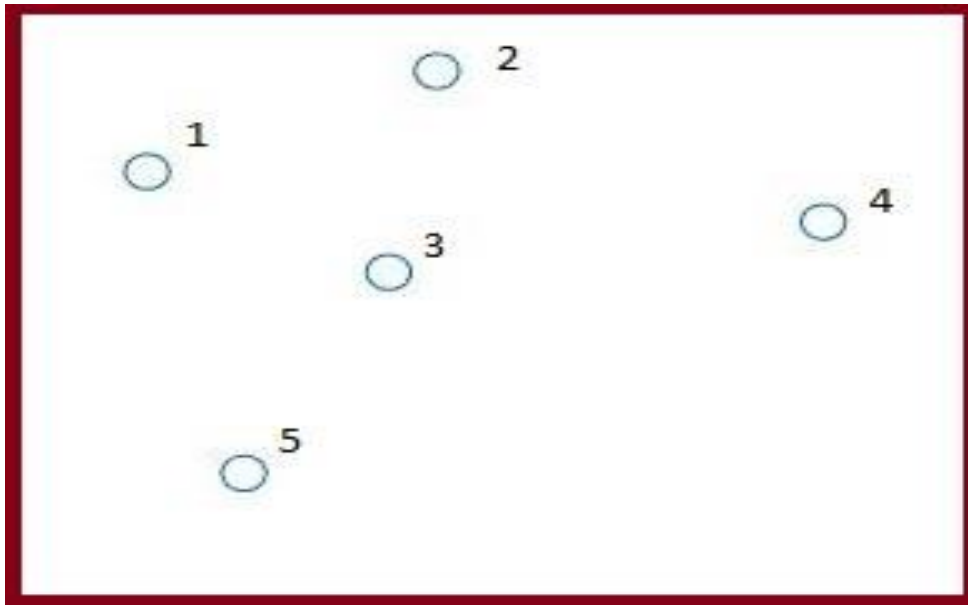
Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση αυτή δημιουργήθηκαν τρία αρχεία m στην Matlab. Ένα που περιλάμβανε της αντικειμενική συνάρτηση, ένα που περιλάμβανε τους μη-γραμμικούς περιορισμούς και ένα που καλούσε την συνάρτηση ga .

3.2 Πηγάδια

Ο αριθμός των πηγαδιών διαδραματίζει βασικό ρόλο στους υπολογισμούς του προβλήματος. Επιλέχθηκε για τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για την εργασία ένας αριθμός $N=5$ πηγαδιών.

Ο λόγος είναι ότι στην πραγματικότητα σε μία δεξαμενή φυσικού αερίου συνήθως αντλούν 4-7 πηγάδια ταυτόχρονα (Brown et al., 2008). Ιδιαίτερη σημασία έχει η τοποθέτηση τους κατά μήκος της επιφάνειας της δεξαμενής και η απόσταση μεταξύ τους καθώς η τιμή της απόστασης μεταξύ των πηγαδιών επηρεάζει την τιμή του μητρώου επιρροής και κατά συνέπεια την πτώση πίεσης στις πηγές.

Επιλέχθηκαν, λοιπόν, 5 πηγάδια τοποθετημένα όπως στο Σχήμα 3-1 και με τις αποστάσεις μεταξύ τους να φαίνονται στον Πίνακα 3-1.



Σχήμα 3-1: Διάταξη πηγών στην επιφάνεια της υποθετικής δεξαμενής

Πίνακας 3-1: Αποστάσεις πηγαδιών.

$d_{1,2}$	5 miles
$d_{1,3}$	5 miles
$d_{1,4}$	10 miles
$d_{1,5}$	8 miles
$d_{2,3}$	5 miles
$d_{2,4}$	6 miles
$d_{2,5}$	10 miles
$d_{3,4}$	6 miles
$d_{3,5}$	5 miles
$d_{4,5}$	10 miles

Η τοποθέτηση των πηγαδιών έγινε με τυχαίο μοτίβο με σκοπό την άντληση αποτελεσμάτων και την μελέτη της επιρροής που έχει η θέση του πηγαδιού στους ρυθμούς άντλησης, στις πτώσεις πίεσης και τελικά στην αντικειμενική συνάρτηση άρα και στο κέρδος.

3.3 Συντελεστής κέρδους

Στο μοντέλο που μελετάται, ο συντελεστής κέρδους ο οποίος και βρίσκεται στην αντικειμενική συνάρτηση, εκφράζει καθαρό κέρδος. Αποτελεί ,δηλαδή το ποσό που κερδίζει ο διαχειριστής του φυσικού αερίου ανά ft^3 που πουλάει. Μέσα, λοιπόν, στον συντελεστή αυτό "κρύβονται" και τα διάφορα κόστη του συνόλου της διαδικασίας, όπως πχ το κόστος εγκατάστασης του πηγαδιού ή το κόστος για τη γεωφυσική μελέτη.

Η μέση τιμή πώλησης φυσικού αερίου στην Αμερική είναι 4 \$/ 10^3ft^3 (U.S. Energy Information Administration, 2017). Επιλέχθηκε η αναφορά στην αγορά της Αμερικής καθώς έχει υποθεθεί πως η δεξαμενή φυσικού αερίου βρίσκεται στην Αμερική.

Επειδή ο διαχειριστής της δεξαμενής φυσικού αερίου δεν έχει ίδιο κέρδος από κάθε πηγή ανά ft^3 , και προκειμένου να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς η διαφοροποίηση αυτή, οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τους συντελεστές κέρδους για το κάθε πηγάδι που βρίσκονται στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2: Συντελεστές κέρδους πηγαδιών.

Πηγάδι	\$/ ft^3
1	0.003
2	0.004
3	0.005
4	0.005
5	0.004

Πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί πως για μία εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες αγοράς και παραγωγής θα πρέπει προηγουμένως να έχει πραγματοποιηθεί μια οικονομοτεχνική μελέτη για χρησιμοποίηση έγκυρων και σωστών συντελεστών κέρδους.

3.4 Ζήτηση

Η ζήτηση αποτελεί την ποσότητα φυσικού αερίου που απαιτείται ανά χρονική περίοδο από τη δεξαμενή. Στους αρχικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ζήτηση της τάξεως των 70 MMSCFD (million standard cubic feet per day), που αποτελεί μία συνηθισμένη τιμή ζήτησης σε μία μεσαίας έκτασης δεξαμενή φυσικού αερίου (U.S. Energy Information Administration, 2015).

Για την εισαγωγή δεδομένων μηνιαίας ζήτησης υπολογίστηκε μέσω Matlab με εύρος τιμών από 70 έως 75 MMSCFD η δημιουργία πίνακα που θα κάλυπτε το πρόβλημα για 30 χρονικές περιόδους δηλαδή 30 ημέρες. Στο Σχήμα 3-2 φαίνεται η ζήτηση για τις 30 αυτές ημέρες με την διακύμανση της όπως υπολογίστηκε στην Matlab.



Σχήμα 3-2: Μηνιαία ζήτηση στην δεξαμενή υπό εξέταση.

Ομοίως με τους συντελεστές κέρδους, ο διαχειριστής και ιδιοκτήτης της δεξαμενής φυσικού αερίου, θα έπρεπε πρώτα να πραγματοποιήσει μια εκτενή πρόβλεψη ζήτησης που να ικανοποιεί και να ταιριάζει στις συνθήκες της αγοράς που βρίσκεται και που θα βοηθήσει τον αλγόριθμο να δώσει τα αποτελέσματα που χρειάζεται για τον προγραμματισμό παραγωγής.

3.5 Μητρώα συναρτήσεων επιρροής

Τα μητρώα συναρτήσεων επιρροής αποτελούν το πιο κομβικό ζήτημα για το υπό εξέταση πρόβλημα, καθώς επηρεάζουν την πλειοψηφία των περιορισμών και καθορίζουν άμεσα τους ρυθμούς άντλησης. Προκειμένου να υπολογιστεί το μητρώο επιρροής για κάθε ζευγάρι πηγαδιών, αντλήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία, που είναι συνηθισμένα σε ένα πηγάδι (Satter et al., 2008) και απεικονίζονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3: Δεδομένα για υπολογισμό μητρώου επιρροής.

\bar{P}	1000 psia
φ	0,12
μ	0,015 cp
k	20 md
r_w	0,25 ft
Drawdown radius	1055 ft

Έχοντας τα στοιχεία του Πίνακα 3-3 και χρησιμοποιώντας την σχέση (2.3.1.1) προκύπτει πως

$$t = 41,1 \times 10^7$$

Και αξιοποιώντας την τιμή του αδιάστατου χρόνου σε συνδυασμό με τις αποστάσεις μεταξύ των πηγών προκύπτει ο Πίνακας 3-4 που περιέχει τις τιμές των μητρώων επιρροής για το κάθε ζευγάρι πηγαδιών που υπολογίστηκαν με χρήση της σχέσης (2.3.2.1) .

Πρέπει να σημειωθεί ότι για τους υπολογισμούς για πάνω από μία χρονική περίοδο, τα μητρώα θεωρήθηκαν σταθερά και χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές για όλες τις χρονικές περιόδους.

Πίνακας 3-4: Τιμές μητρώων επιρροής.

Φ_{ij}	1	2	3	4	5
1	0	7,1	7,1	6,4	6,6
2	7,1	0	7,1	6,9	6,4
3	7,1	7,1	0	6,9	7,1
4	6,4	6,9	6,9	0	6,4
5	6,6	6,4	7,1	6,4	0

3.6 Πτώση πίεσης

Οι τεχνικοί που ελέγχουν τις βάνες στα πηγάδια, δεν επιτρέπουν την πίεση κεφαλής πηγής να πέσει πάνω από 800-900 psia από την αρχική της τιμή (Tian et al., 2014). Λόγω του γεγονότος αυτού επιλέχθηκε τιμή $p_i^{-k}=900$ psia αλλά και $p_i^{-l}=900$ psia ώστε να μην επιτρέπεται μεγαλύτερη πτώση πίεσης από αυτή την τιμή, συνολικά για όλες τις χρονικές περιόδους σε ένα πηγάδι αλλά και ταυτόχρονα να μην επιτρέπεται μεγαλύτερη πτώση πίεσης από αυτήν την τιμή για μία χρονική περίοδο.

3.7 Σενάρια προς μελέτη

Πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές για την δοκιμή του μαθηματικού μοντέλου, αλλά αυτό που παρουσιάζεται στα αποτελέσματα αποτελεί το βασικό σενάριο προς μελέτη που αφορά δοκιμή με $N=5$ πηγάδια και $K=30$ χρονικές περιόδους δηλαδή μέρες. Έγινε, λοιπόν, μία μελέτη ενός μηνιαίου προγραμματισμού παραγωγής. Στο βασικό σενάριο χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές κέρδους που έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 3.3.

Προκειμένου, όμως, να προκύψει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη σχετικά με την επίδραση των συντελεστών κέρδους στο μοντέλο προς μελέτη, εξετάστηκε και ένα εναλλακτικό σενάριο στο οποίο όλα τα πηγάδια έχουν ίδιο συντελεστή κέρδους.

Προκειμένου να στηθούν αυτά τα σενάρια, αρχικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τα 5 πηγάδια σε μία χρονική περίοδο με ζήτηση 30MMSCFD αλλά και σε 2 χρονικές περιόδους. Των οποίων τα αποτελέσματα βοήθησαν στην αξιολόγηση του βασικού σεναρίου.

3.8 Ο αλγόριθμος

Όπως αναφέρθηκε, προκειμένου να τρέξει το πρόβλημα βελτιστοποίησης χρειάστηκαν τρία αρχεία m. Το ένα από αυτά είναι το αρχείο που περιλαμβάνει την συνάρτηση ga. Στο Σχήμα 3-3 φαίνεται το αρχείο αυτό το οποίο αποτέλεσε και το βασικό περιβάλλον εργασίας για τους υπολογισμούς. Υπάρχουν $2*N*K$ μεταβλητές καθώς οι πρώτες $N*K$ είναι οι ρυθμοί άντλησης σε κάθε πηγάδι για κάθε χρονική περίοδο ενώ οι επόμενες $N*K$ είναι η δυαδική μεταβλητή απόφασης που αντιστοιχεί σε κάθε πηγάδι για κάθε χρονική περίοδο και αποφασίζει εάν θα αντλήσει(1) ή όχι(0). Ο μέγιστος αριθμός γενεών έχει τεθεί σε $100*nvars$ όπως προτείνεται στο εγχειρίδιο χρήσης του optimization toolbox της Matlab.

Τα άλλα δύο αρχεία m. περιλάμβαναν την αντικειμενική συνάρτηση και τους μη γραμμικούς περιορισμούς τα οποία καλούνται μέσω της συνάρτησης ga.

Επίσης, επειδή η συνάρτηση λύνει μόνο προβλήματα ελαχιστοποίησης ενώ το πρόβλημα που απασχολεί την εργασία αποτελεί πρόβλημα μεγιστοποίησης, χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν με αρνητικό πρόσημο οι συντελεστές κέρδους ώστε να μετασχηματιστεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης και να δώσει τα απαιτούμενα αποτελέσματα.


```

tic;

N=;
K=;

%Για επαναληψιμότητα των τυχαίων τιμών
rng(1);

%Αριθμός μεταβλητών
nvars=2*N*K;

% Οι πρώτες N*K μεταβλητές είναι ρυθμοί άντλησης κάθε πηγής για κάθε
% χρονική περίοδο, ενώ οι επόμενες N*K είναι ακέραιες-δυναμικές που δείχνουν εάν
% αντλώ ή όχι

intcon=N*K+1:2*N*K;

%Θέτω άνω και κάτω όρια. Ορίζω και τις δυναμικές μεταβλητές βάζοντας στις
%ακέραιες μέγιστο όριο 1 ώστε να γίνουν δυναμικές

lb=zeros(2*N*K,1);
ub=inf(2*N*K,1);
ub((N*K+1):2*N*K)=1;

opts = optimoptions(@ga, ...
    'PopulationSize', 150, ...
    'MaxGenerations', 100*nvars, ...
    'EliteCount', 10, ...
    'FunctionTolerance', 1e-8, ...
    'PlotFcn', {@gaplotbestf,@gaplotbestindiv,});

[x,fval,output,population,scores] =
ga(@ProductionSchedulingga,nvars,[],[],[],lb,ub,@nonlconga,intcon,opts);

%Κάνω reshape ώστε στο ένα page να έχω τους ρυθμούς άντλησης και στο άλλο
%τις δυναμικές μεταβλητές που δείχνουν εάν αντλώ ή όχι
solution=reshape(x,[N,K,2]);

toc;

```

Σχήμα 3-3:Αρχείο m. που καλεί την συνάρτηση ga για τους υπολογισμούς του προβλήματος.

4 Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εκτέλεση των υπολογισμών που αναφέρθηκαν στο υπολογιστικό μοντέλο με βάση το μαθηματικό μοντέλο.

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που δίνει η Matlab για τα 5 πηγάδια σε 1 χρονική περίοδο δηλαδή σε μία ημέρα.

4.1 Αποτελέσματα για 5 πηγάδια και 1 χρονική περίοδο

4.1.1 Αντικειμενική Συνάρτηση

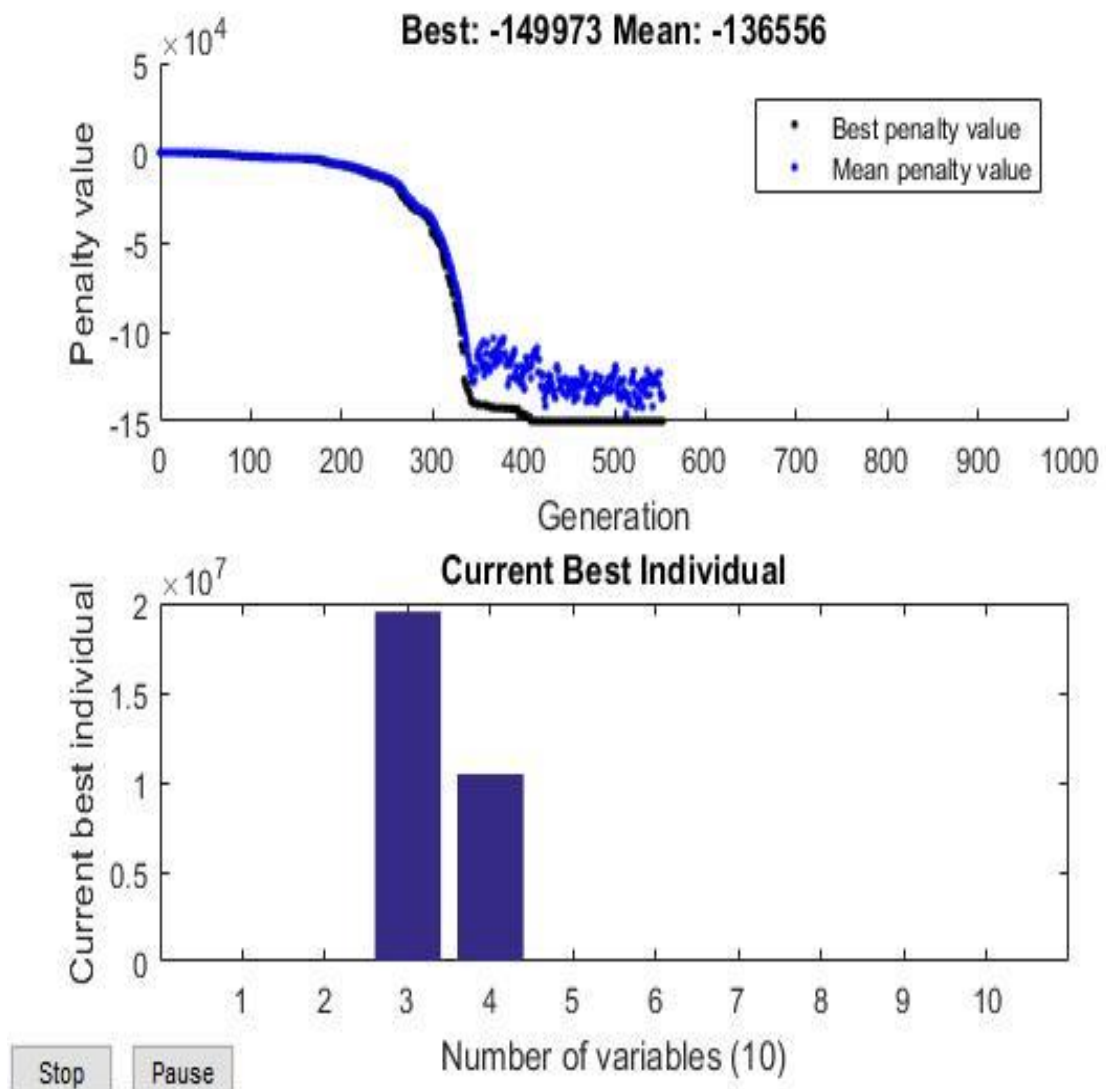
Πραγματοποιήθηκαν 10 δοκιμές στον αλγόριθμο προκειμένου να ληφθούν όσο το δυνατόν πιο ασφαλή αποτελέσματα. Στον Πίνακα 4-1 φαίνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του κέρδους, στις 10 δοκιμές ενώ φαίνεται και ο χρόνος που χρειάστηκε για να “τρέξει” ο αλγόριθμος και να δώσει αυτά τα αποτελέσματα.

Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης για 10 δοκιμές.

Δοκιμή	fval(\$)	t(s)
1	\$ 149.990,00	28,27
2	\$ 149.530,00	30,69
3	\$ 149.690,00	30,65
4	\$ 149.065,00	31,76
5	\$ 131.422,00	30,55
6	\$ 149.696,00	31,74
7	\$ 149.980,00	30,84
8	\$ 149.866,00	30,89
9	\$ 149.973,00	17,33
10	\$ 131.564,00	30,91

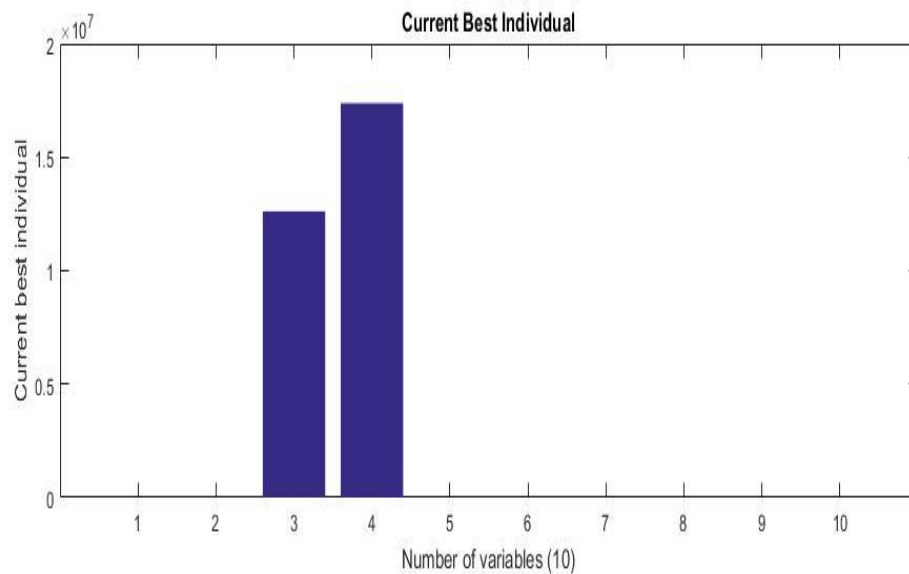
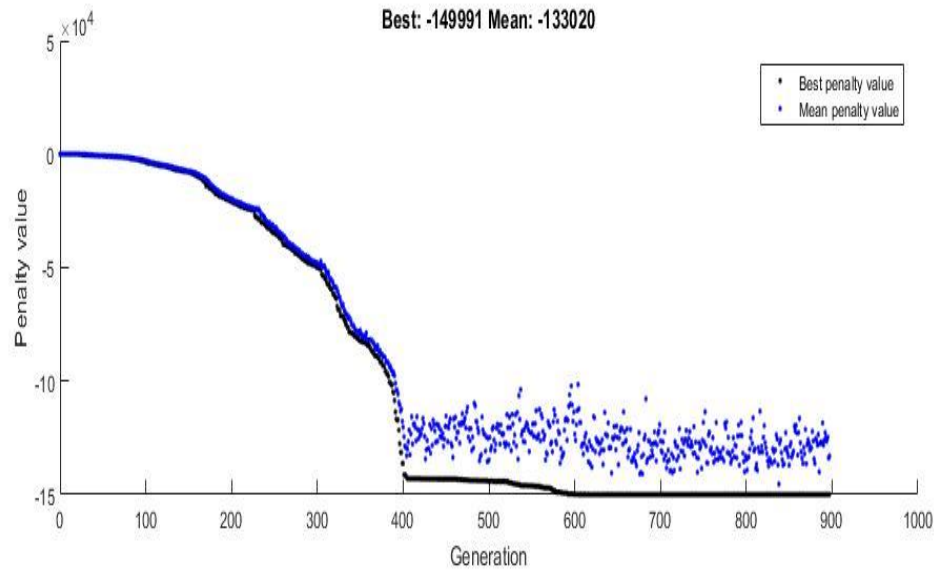
Παρατηρείται πως δεν προέκυψαν γενικά σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά ούτε και στον χρόνο βελτιστοποίησης. Εξαιρέση αποτέλεσαν οι δοκιμές 5 και 10 που προέκυψε αρκετά χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης από ότι στις υπόλοιπες αλλά και στην δοκιμή 9 εμφανίστηκε πολύ χαμηλότερη τιμή χρόνου βελτιστοποίησης λόγω ταχύτερης σύγκλισης αλλά και λόγω ικανοποίησης του κριτηρίου σύγκλισης.

Στο Σχήμα 4-1 φαίνονται τα διαγράμματα που τύπωσε η Matlab και περιγράφουν το μεν πρώτο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κατά την διάρκεια των επαναλήψεων και το δε δεύτερο την τιμή των μεταβλητών απόφασης για το καλύτερο άτομο στον αλγόριθμο. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την δοκιμή 9 που υπήρξε η ταχύτερη σύγκλιση και ο μικρότερος απαιτούμενος αριθμός γενεών.



Σχήμα 4-1: Διαγράμματα της Matlab για 5 πηγάδια και 1 πηγή(α).

Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζονται, επίσης, και τα αντίστοιχα διαγράμματα για την δοκιμή 1 που πέτυχε την υψηλότερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση.



Stop Pause

Σχήμα 4-2: Διαγράμματα της Matlab για 5 πηγάδια και 1 πηγή(β).

4.1.2 Μεταβλητές απόφασης

Μεταβλητές απόφασης για το πρόβλημα αποτέλεσαν τόσο οι ρυθμοί άντλησης για κάθε πηγάδι σε κάθε χρονική περίοδο όσο και το αν αντλείται το πηγάδι ή όχι κάθε χρονική περίοδο. Ο τρόπος που δομήθηκε ο αλγόριθμος δεν επέτρεπε στους ρυθμούς άντλησης να λάβουν θετική τιμή εάν η αντίστοιχη δυαδική μεταβλητή απόφασης ήταν ίση με 0. Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζονται οι ρυθμοί άντλησης για τα 5 πηγάδια κατά τη διάρκεια των 10 δοκιμών σε ft³/day.

Πίνακας 4-2: Ρυθμοί άντλησης των 5 πηγαδιών στις 10 δοκιμές.

Δοκιμή	Πηγάδι 1	Πηγάδι 2	Πηγάδι 3	Πηγάδι 4	Πηγάδι 5
1	0	9.000,00	12.612.000,00	17.379.000,00	0
2	0	373.000,00	21.343.000,00	8.187.000,00	98.000,00
3	0	7.000,00	29.324.000,00	366.000,00	303.000,00
4	0	914.000,00	409.000,00	28.662.000,00	13.000,00
5	0	12.678.000,00	9.343.000,00	2.089.000,00	5.888.000,00
6	0	11.000,00	19.427.000,00	10.270.000,00	292.000,00
7	0	7.000,00	5.260.000,00	24.729.000,00	2.000,00
8	0	100.000,00	24.977.000,00	4.889.000,00	34.000,00
9	0	0	19.523.000,00	10.450.000,00	27.000,00
10	0	7.132.000,00	4.190.000,00	7.444.000,00	11.215.000,00

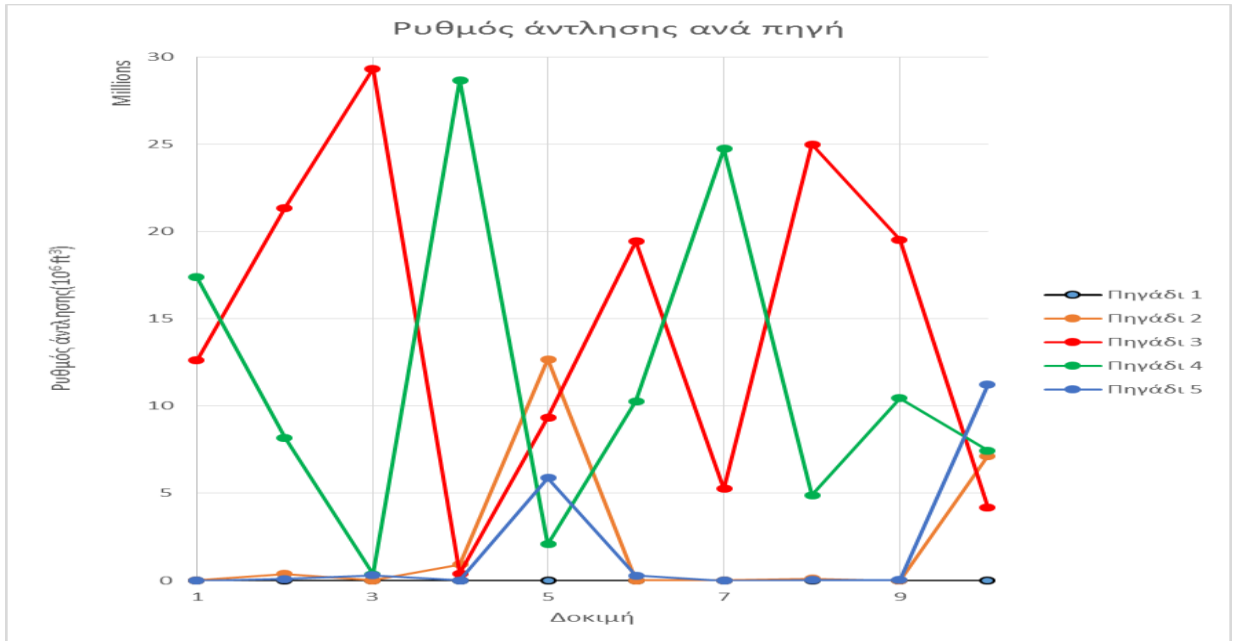
Υπενθυμίζονται και οι συντελεστές κέρδους για κάθε πηγάδι στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3: Συντελεστές κέρδους για κάθε πηγάδι.

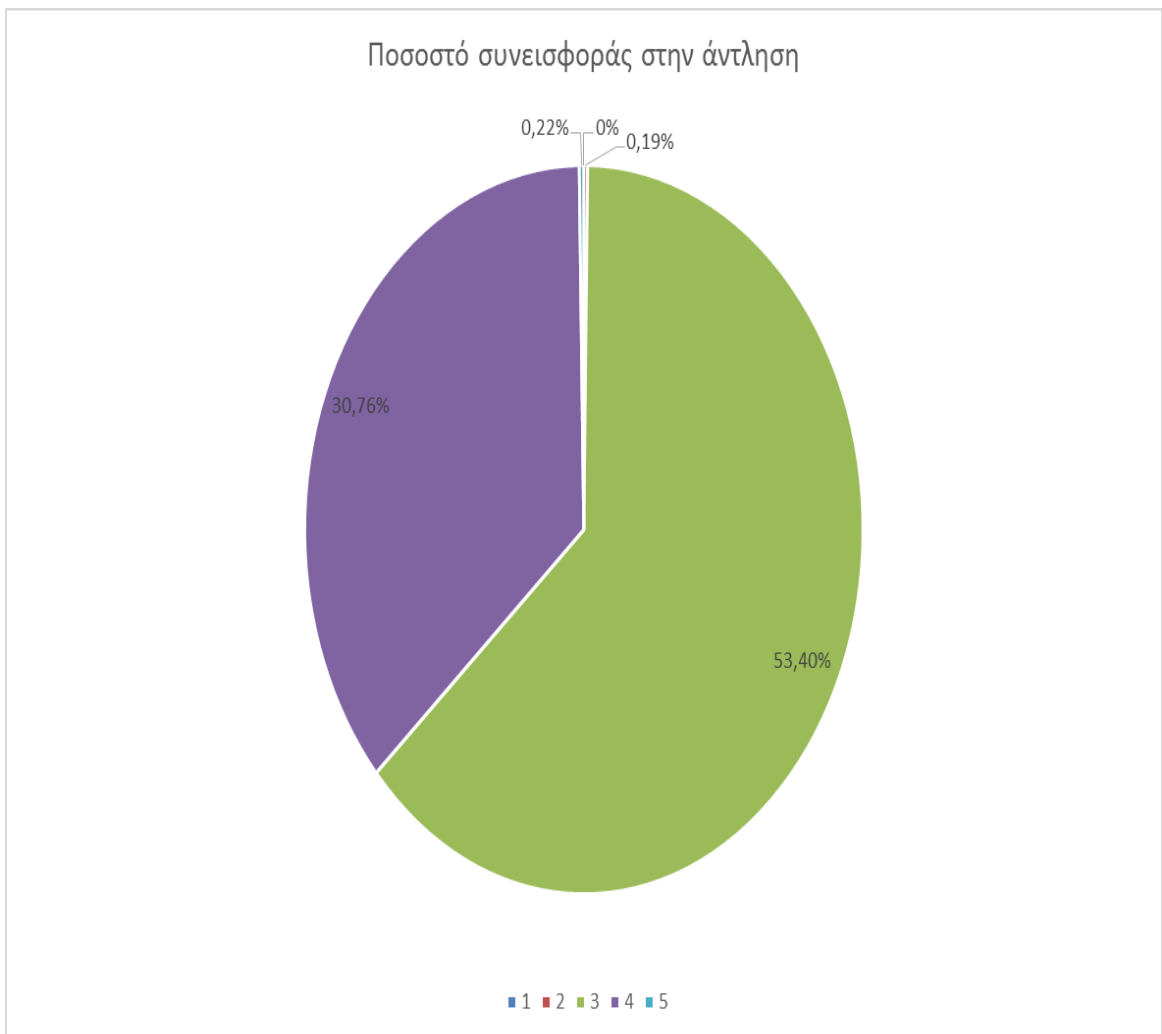
Πηγάδι	\$/ ft ³
1	0.003
2	0.004
3	0.005
4	0.005
5	0.004

Παρατηρείται πως σε όλες τις δοκιμές έχει παρθεί η απόφαση να μην αντληθεί το πηγάδι 1. Αυτό επιλέγεται από τον αλγόριθμο λόγω του χαμηλού συντελεστή κέρδους που του έχει δοθεί.

Παρατηρείται, επίσης, πως σε όλες τις δοκιμές, τους υψηλότερους ρυθμούς άντλησης τους έχουν τα πηγάδια 3 και 4 που έχουν τον μεγαλύτερο συντελεστή κέρδους. Παράλληλα, το πηγάδι 3 έχει συνολικά την μεγαλύτερη συνεισφορά λόγω της θέσης του στην επιφάνεια της δεξαμενής, λόγω του γεγονότος, δηλαδή, ότι βρίσκεται πιο κοντά και γειπνιάζει με τα άλλα πηγάδια σε σχέση με το πηγάδι 4. Στο Σχήμα 4-3 φαίνεται το διάγραμμα που σχηματίζουν οι ρυθμοί άντλησης κάθε πηγαδιού κατά τη διάρκεια των δοκιμών, ενώ στο Σχήμα 4-4 φαίνεται το μέσο ποσοστό συνεισφοράς στην άντληση κάθε πηγαδιού στην πορεία των 10 δοκιμών.



Σχήμα 4-3: Ρυθμοί άντλησης ανά πηγάδι για τις 10 χρονικές περιόδους.



Σχήμα 4-4: Μέσο ποσοστό συνεισφοράς άντλησης 5 πηγαδιών.

4.2 Αποτελέσματα για 5 πηγάδια και 2 χρονικές περιόδους

4.2.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Πραγματοποιήθηκαν 7 δοκιμές στον αλγόριθμο προκειμένου να ληφθούν όσο το δυνατόν πιο ασφαλή αποτελέσματα. Στον Πίνακα 4-4 φαίνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του κέρδους, στις 7 δοκιμές ενώ φαίνεται και ο χρόνος που χρειάστηκε για να “τρέξει” ο αλγόριθμος και να δώσει αυτά τα αποτελέσματα.

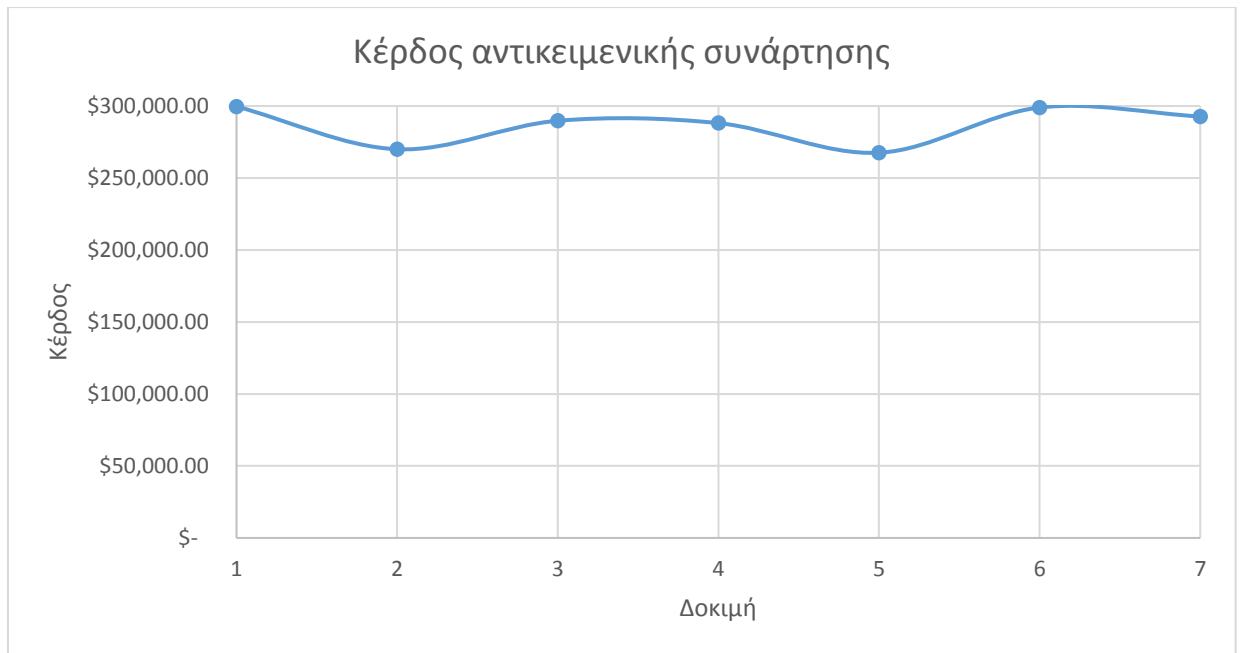
Πίνακας 4-4:Αποτελέσματα κέρδους-χρόνου για τις 7 δοκιμές.

Δοκιμή	fval	t(s)
1	\$ 299.640,00	22,82
2	\$ 269.990,00	24,79
3	\$ 289.753,00	59,37
4	\$ 288.131,00	18,88
5	\$ 267.550,00	91,74
6	\$ 298.967,00	50,56
7	\$ 292.722,00	77,44

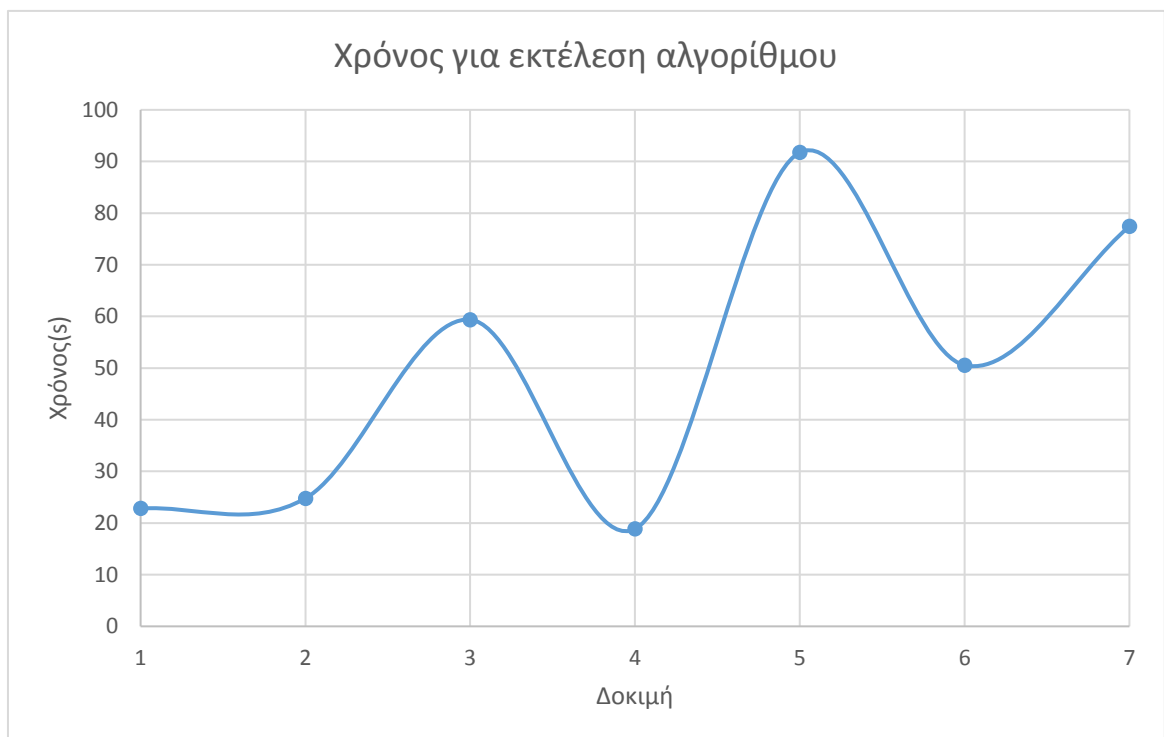
Παρατηρείται πως σε γενικές γραμμές δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλείσεις στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κατά τη διάρκεια των διάφορων δοκιμών. Η μεγαλύτερη τιμή έχει επιτευχθεί στην δοκιμή 1.

Αντιθέτως, υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις στην τιμή του χρόνου βελτιστοποίησης καθώς σε κάποιες δοκιμές υπήρχε γρήγορη ικανοποίηση του κριτηρίου σύγκλισης ενώ σε άλλες χρειάστηκε ο μέγιστος αριθμός γενεών. Ταχύτερος χρόνος επιτεύχθη στην δοκιμή 4.

Στο Σχήμα 4-5 φαίνεται το διάγραμμα μεταβολής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά τη διάρκεια των δοκιμών ενώ στο Σχήμα 4-6 το διάγραμμα μεταβολής του χρόνου κατά τη διάρκεια των δοκιμών.



Σχήμα 4-5:Κέρδος αντικειμενικής συνάρτησης για 5 πηγάδια και 2 χρονικές περιόδους.



Σχήμα 4-6:Χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου για 5 πηγάδια και 2 χρονικές περιόδους

4.2.2 Μεταβλητές απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης για το πρόβλημα αυτό ήταν 20. Οι πρώτες 10 ήταν οι ρυθμοί άντλησης για κάθε πηγάδι και κάθε χρονική περίοδο ενώ οι επόμενες 10 οι

δυναμικές μεταβλητές Στον Πίνακα 4-5 παρουσιάζονται οι ρυθμοί άντλησης για τα 5 πηγάδια για κάθε χρονική περίοδο κατά διάρκεια των 7 δοκιμών σε $10^6 \text{ ft}^3/\text{day}$.

Πίνακας 4-5:Ρυθμοί άντλησης κάθε πηγαδιού για τις 7 δοκιμές.

Δοκιμή	Χρονική Περίοδος	Πηγάδι 1	Πηγάδι 2	Πηγάδι 3	Πηγάδι 4	Πηγάδι 5
1	1	0	0,0033	0,1014	2,8942	0,0011
	2	0,0003	0,0044	0,4898	2,4794	0,0261
2	1	0	0,0007	1,2003	1,7955	0,0035
	2	0,0075	2,9806	0,001	0,0097	0,0012
3	1	0	0,6318	0,0011	2,3656	0,0014
	2	0,0029	0,3485	1,1133	1,4982	0,0371
4	1	0	0,002	2,749	0,2471	0,0019
	2	0,0009	1,177	0,6756	1,1423	0,0043
5	1	0	0,3947	0,0054	0,0012	2,5988
	2	0,0672	0,0028	2,8122	0,0035	0,1143
6	1	0	0,0013	0,183	2,8146	0,0011
	2	0,017	0,0423	0,0447	2,8715	0,0245
7	1	0	0,0754	0,0028	2,2725	0,6494
	2	0,0003	0,0008	0,8516	2,1455	0,0018

Παρατηρείται πως όπως και στην περίπτωση της μίας χρονικής περιόδου το μεγαλύτερο κομμάτι της άντλησης το αναλαμβάνουν τα πηγάδια 3 και 4 που έχουν τον μεγαλύτερο συντελεστή κέρδους. Στην περίπτωση αυτή όμως, παρατηρείται ότι στην χρονική περίοδο 2 το πηγάδι 1 που δεν είχε συμμετοχή στην πρώτη περίπτωση, "αναγκάζεται" να συνδράμει, με μικρό ποσοστό βέβαια. Αυτό δείχνει το πώς αλλάζει

το πλάνο παραγωγής όταν υπάρχουν πολλές χρονικές περιόδους, φαινόμενο που παρατηρείται καλύτερα στο βασικό σενάριο

4.3 Βασικό σενάριο

4.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Το βασικό σενάριο υπό εξέταση αποτέλεσε ο προγραμματισμός παραγωγής σε δεξαμενή φυσικού αερίου με 5 πηγάδια και για χρονικό ορίζοντα 30 ημερών, δηλαδή για έναν μήνα. Στο υπολογιστικό μοντέλο αναλύθηκε τόσο η ζήτηση που έχει επιλεχθεί όσο και οι υπόλοιποι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψιν.

Δεδομένου ότι πλέον υπάρχουν $N=5$ πηγάδια και $K=30$ χρονικές περιόδους οι μεταβλητές πλέον του προβλήματος είναι $2*N*K=300$, από τις οποίες οι 150 είναι οι ρυθμοί άντλησης.

4.3.2 Μεταβλητές απόφασης

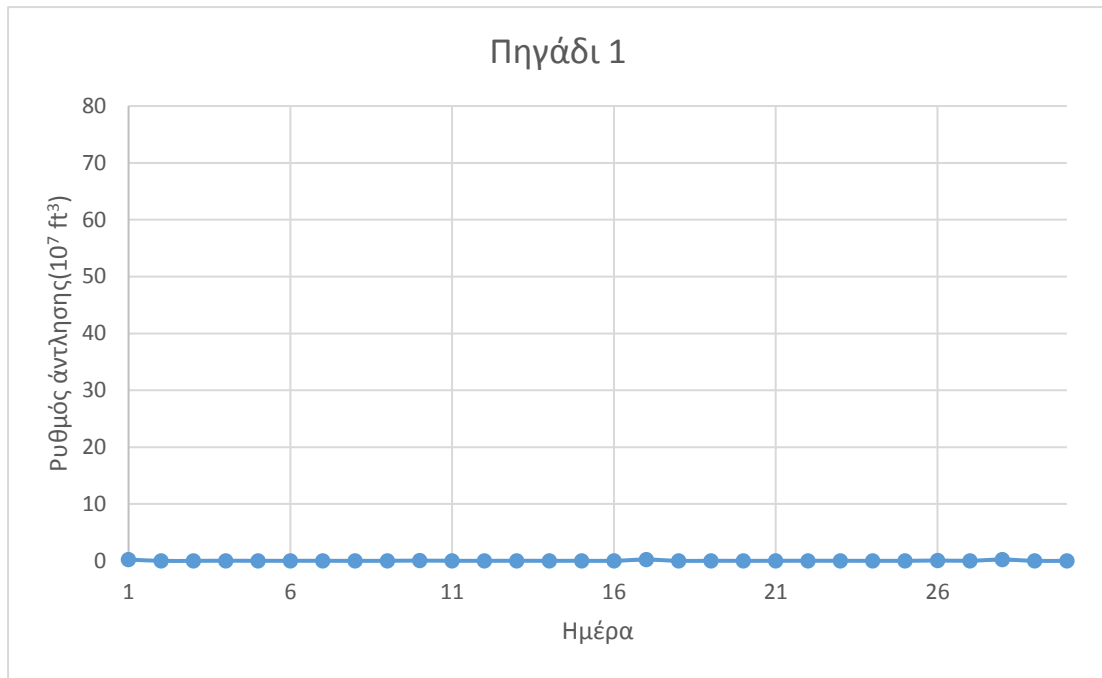
Το γεγονός των πολλών μεταβλητών επηρέασε χρονικά τον υπολογισμό του προβλήματος, καθώς ο αλγόριθμος έδωσε αποτελέσματα πολύ πιο αργά σε σχέση με την περίπτωση των 10 ή των 20 μεταβλητών, γεγονός αναμενόμενο.

Ο υπολογισμός του προβλήματος έδωσε λύση που αντιστοιχεί σε τιμή αντικειμενικής συνάρτησης-κέρδους ίση με 8.956.967,00 \$ ενώ είχε χρόνο υπολογισμού του προβλήματος ίσο με 10.32 λεπτά.

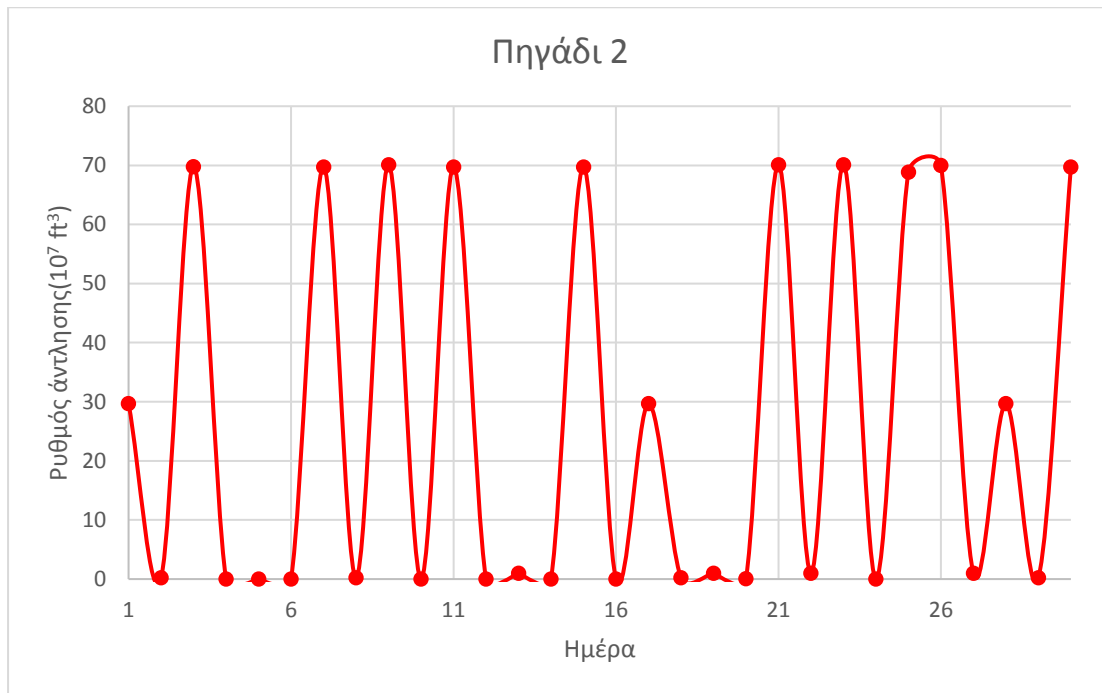
Στον Πίνακα 4-6 φαίνονται οι τιμές για τους ρυθμούς άντλησης σε κάθε πηγάδι και κάθε ημέρα ενώ στα Σχήματα 4-7 έως 4-11 φαίνονται διαγραμματικά οι μεταβολές στον ρυθμό άντλησης (MMSCFD) για κάθε πηγάδι, κάθε ημέρα.

Πίνακας 4-6:Ρυθμοί άντλησης για το βασικό σενάριο.

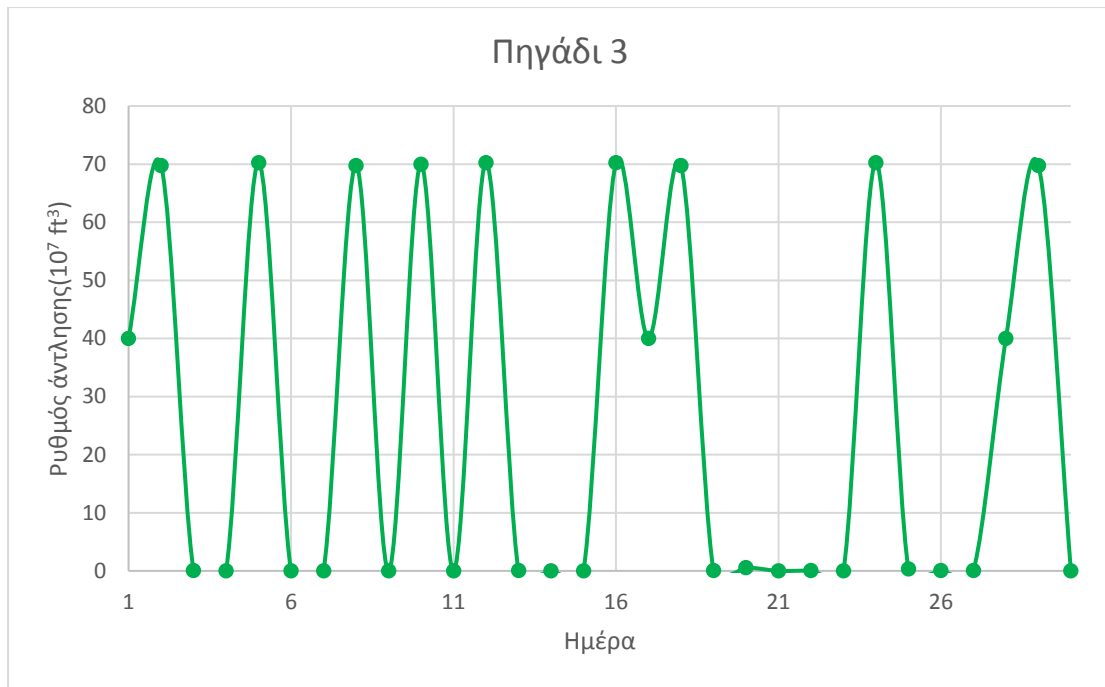
Ημέρα/Πηγάδι	1	2	3	4	5
1	0,237	29,697	40,004	0,012	0,01
2	0,004	0,234	69,784	0,01	0,006
3	0,008	69,782	0,079	0,008	0,008
4	0,025	0,014	0,012	0,012	70,116
5	0,014	0,02	70,259	0,01	0,024
6	0,014	0,01	0,004	0,006	69,391
7	0,019	69,719	0,01	0,009	0,041
8	0,004	0,234	69,784	0,01	0,006
9	0,015	70,103	0,012	0,01	0,011
10	0,044	0,004	69,979	0,01	0,01
11	0,019	69,719	0,01	0,009	0,041
12	0,014	0,02	70,259	0,01	0,024
13	0,022	0,991	0,058	0,927	68,502
14	0,01	0,014	0,009	0,01	0,02
15	0,019	69,719	0,01	0,009	0,041
16	0,014	0,02	70,259	0,01	0,024
17	0,237	29,697	40,004	0,012	0,01
18	0,004	0,234	69,784	0,01	0,006
19	0,022	0,991	0,058	0,927	68,502
20	0,006	0,035	0,577	69,94	0,114
21	0,015	70,103	0,012	0,01	0,011
22	0,022	0,991	0,058	0,927	68,502
23	0,015	70,103	0,012	0,01	0,011
24	0,014	0,02	70,259	0,01	0,024
25	0,01	68,824	0,335	0,021	0,483
26	0,062	69,97	0,043	0,011	0,16
27	0,022	0,991	0,058	0,927	68,502
28	0,237	29,697	40,004	0,012	0,01
29	0,004	0,234	69,784	0,01	0,006
30	0,019	69,719	0,01	0,009	0,041



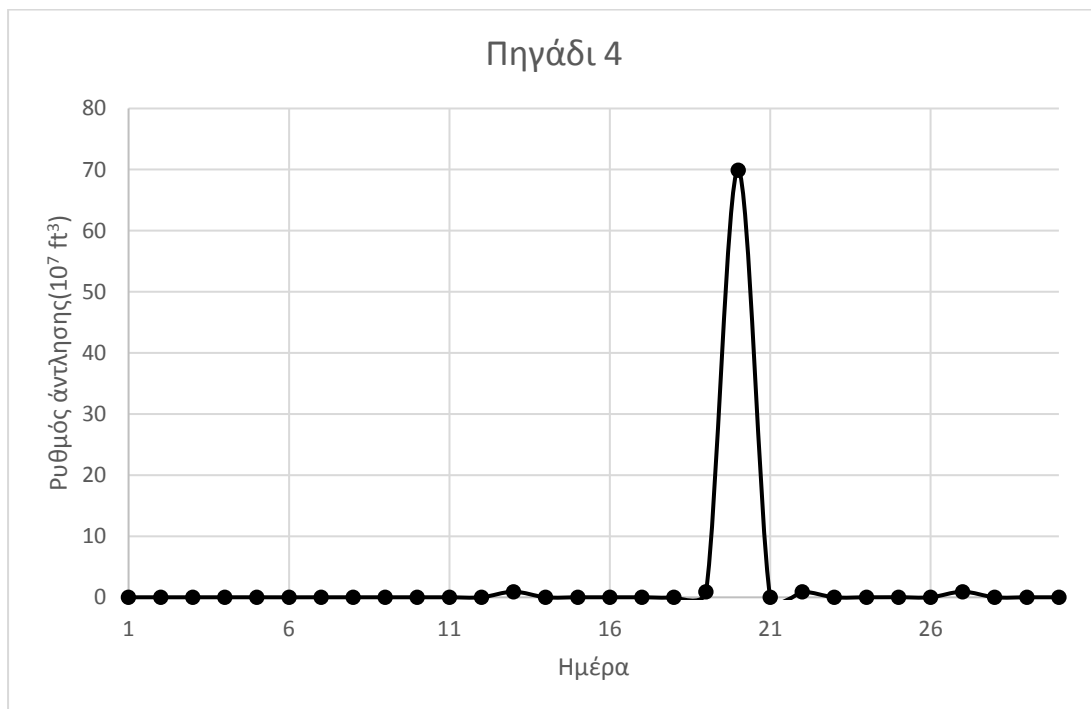
Σχήμα 4-7: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 1.



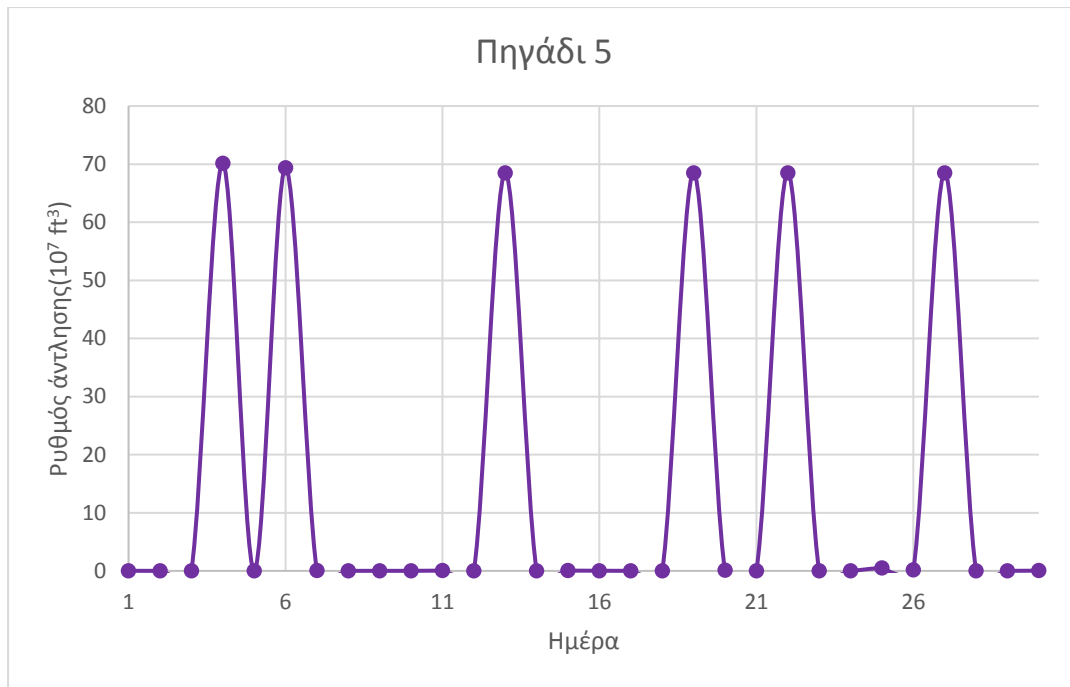
Σχήμα 4-8: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 2.



Σχήμα 4-9: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 3.



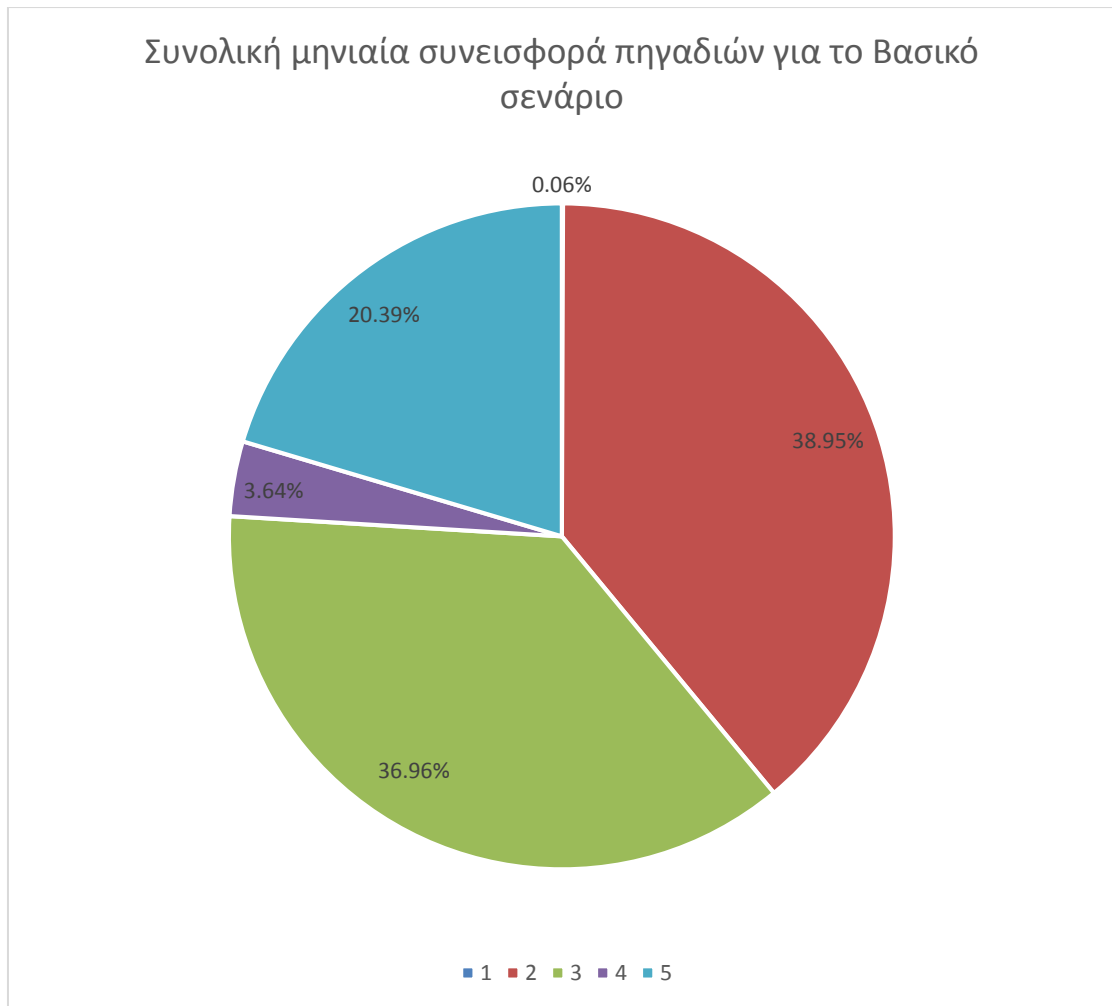
Σχήμα 4-10: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 4.



Σχήμα 4-11: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης βασικού σεναρίου για το Πηγάδι 5.

Παρατηρείται πως, για την περίπτωση των 30 ημερών, αξιοποιούνται όλα τα πηγάδια, “μοιράζοντας” έτσι, την απαίτηση για την άντληση από την δεξαμενή. Ανάλογα με την ημέρα, κάθε πηγάδι έχει διακυμάνσεις στον ρυθμό που αντλεί ώστε να ικανοποιηθεί τόσο ο περιορισμός για την πτώση πίεσης όσο και για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός που υποχρεώνει σε μικρότερη (ή ίση) παραγωγή από την ζήτηση. Όπως φαίνεται βέβαια και στο Σχήμα 4-12, το πηγάδι 1 και το πηγάδι 4 έχουν μικρή συνεισφορά στην άντληση, γεγονός που θα εξηγηθεί στα συμπεράσματα.

Παράλληλα έχει τεθεί περιορισμός στα πηγάδια να μην μπορούν να αντλούν με ρυθμό μεγαλύτερο του 10^8 ft^3 καθώς από αυτήν την τιμή και μετά παρατηρούνται φαινόμενα στις σωληνώσεις που καθυστερούν την παραγωγή και αποδεικνύονται ασύμφορα.



Σχήμα 4-12: Συνολική μηνιαία συνεισφορά πηγαδιών για το Βασικό σενάριο.

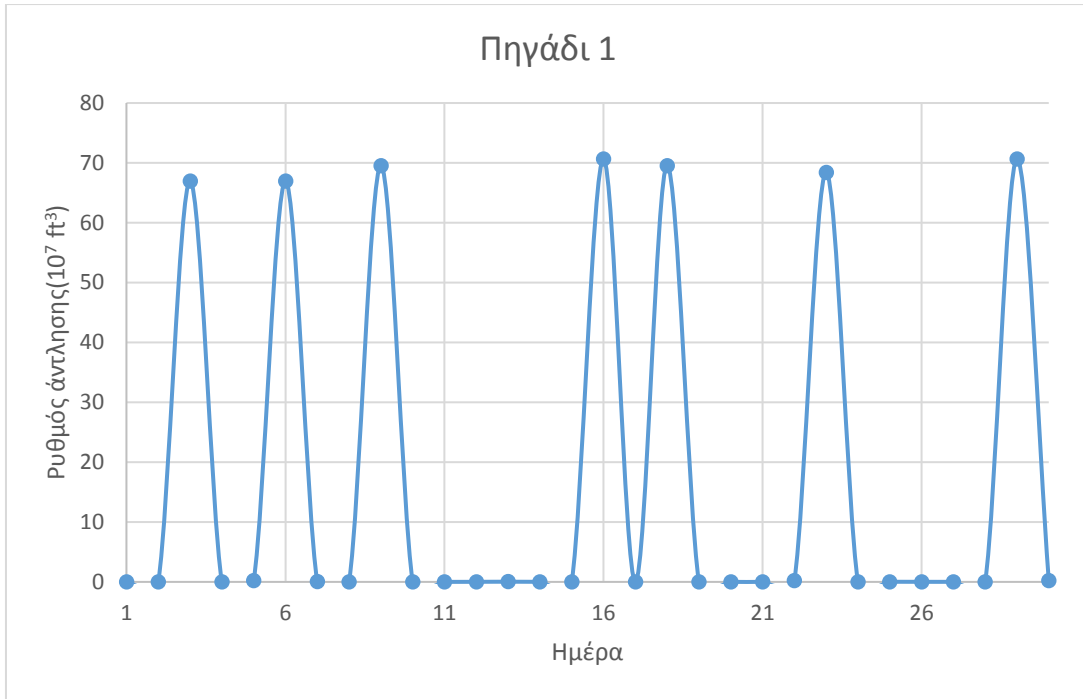
4.4 Εναλλακτικό σενάριο

Η τελευταία μελέτη που πραγματοποιήθηκε αφορούσε την ίδια δεξαμενή πάλι με 5 πηγάδια, αλλά που αυτή τη φορά έχουν όλα ίδιο συντελεστή κέρδους ίσο με $0,004 \text{ \$/ft}^3$. Για την μελέτη αυτή η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή το κέρδος που προέκυψε είναι ίσο με $8.106.172,00 \text{ \$}$, ενώ ο χρόνος που “έτρεχε” ο αλγόριθμος ήταν 11.63 λεπτά αφού ικανοποίησε σχετικά νωρίς το κριτήριο σύγκλισης.

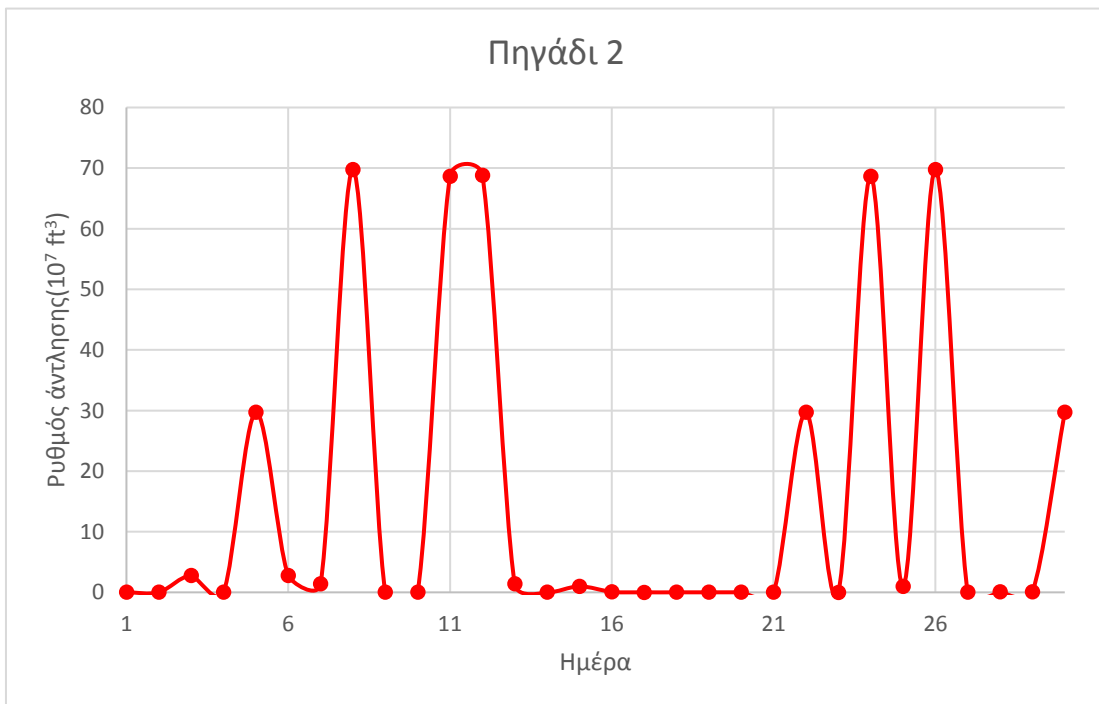
Όπως φαίνεται, προκύπτει μικρότερο κέρδος από την προηγούμενη δοκιμή. Στον Πίνακα 4-7 φαίνονται οι τιμές για τους ρυθμούς άντλησης σε κάθε πηγάδι και κάθε ημέρα ενώ στα Σχήματα 4-13 έως 4-17 φαίνονται οι διαγραμματικά οι μεταβολές στον ρυθμό άντλησης για κάθε πηγάδι, κάθε ημέρα.

Πίνακας 4-7:Ρυθμοί άντλησης για το εναλλακτικό σενάριο.

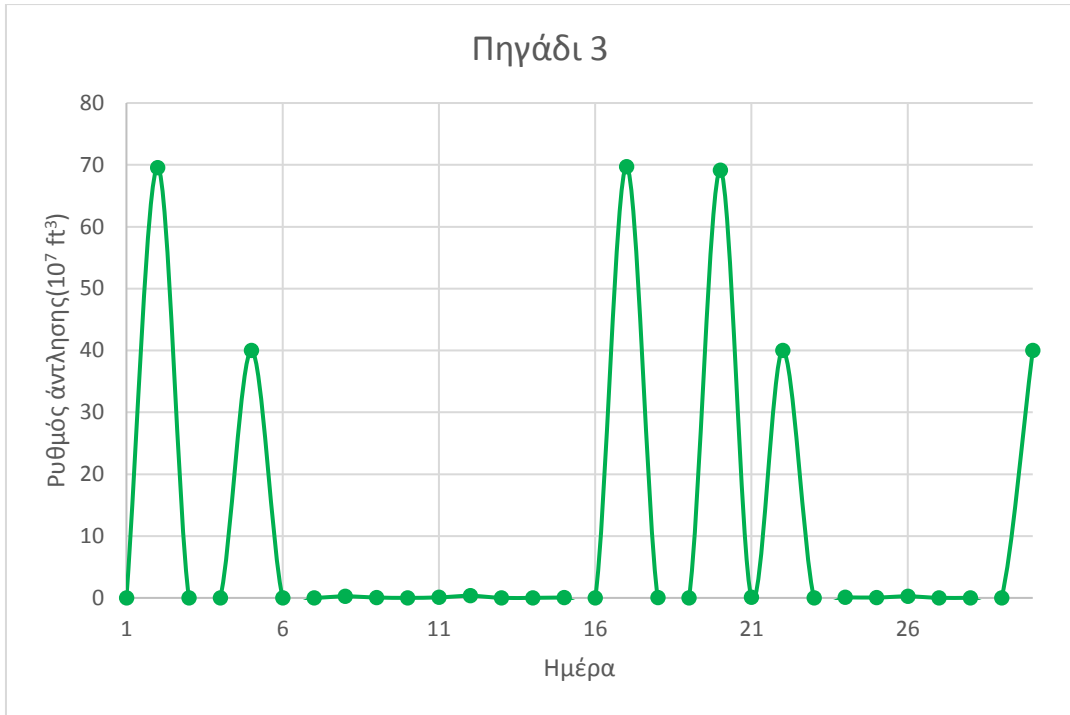
Ημέρα/Πηγάδι	1	2	3	4	5
1	0	0,006	0,016	69,693	0,012
2	0,012	0,016	69,547	0,007	0,062
3	66,931	2,763	0,014	0,004	0,006
4	0,01	0,025	0,004	69,612	0,013
5	0,237	29,697	40,004	0,012	0,01
6	66,931	2,763	0,014	0,004	0,006
7	0,03	1,401	0,008	0,695	67,359
8	0,01	69,735	0,247	0,304	0,009
9	69,547	0,007	0,062	0,012	0,016
10	0,01	0,025	0,004	69,612	0,013
11	0,004	68,64	0,083	0,01	1,237
12	0,01	68,824	0,335	0,021	0,483
13	0,03	1,401	0,008	0,695	67,359
14	0,01	0,011	0,009	69,094	0,876
15	0,022	0,991	0,058	0,927	68,502
16	70,621	0,091	0,021	0,01	0,017
17	0,011	0,004	69,697	0,01	0,014
18	69,547	0,007	0,062	0,012	0,016
19	0	0,006	0,016	69,693	0,012
20	0,006	0,01	69,119	0,055	0,155
21	70,621	0,091	0,021	0,01	0,017
22	0,237	29,697	40,004	0,012	0,01
23	68,418	0,005	0,01	0,007	1,961
24	0,004	68,64	0,083	0,01	1,237
25	0,022	0,991	0,058	0,927	68,502
26	0,01	69,735	0,247	0,304	0,009
27	0,01	0,011	0,009	69,094	0,876
28	0,02	0,065	0,014	68,04	0,015
29	70,621	0,091	0,021	0,01	0,017
30	0,237	29,697	40,004	0,012	0,01



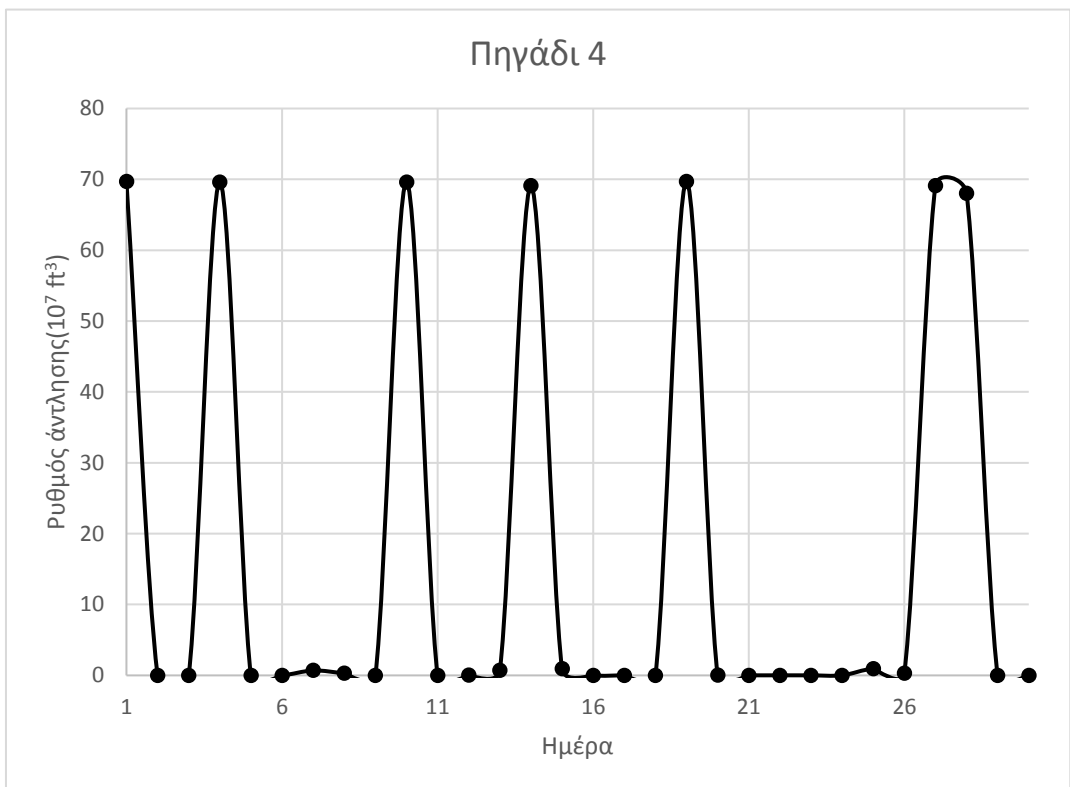
Σχήμα 4-13: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 1.



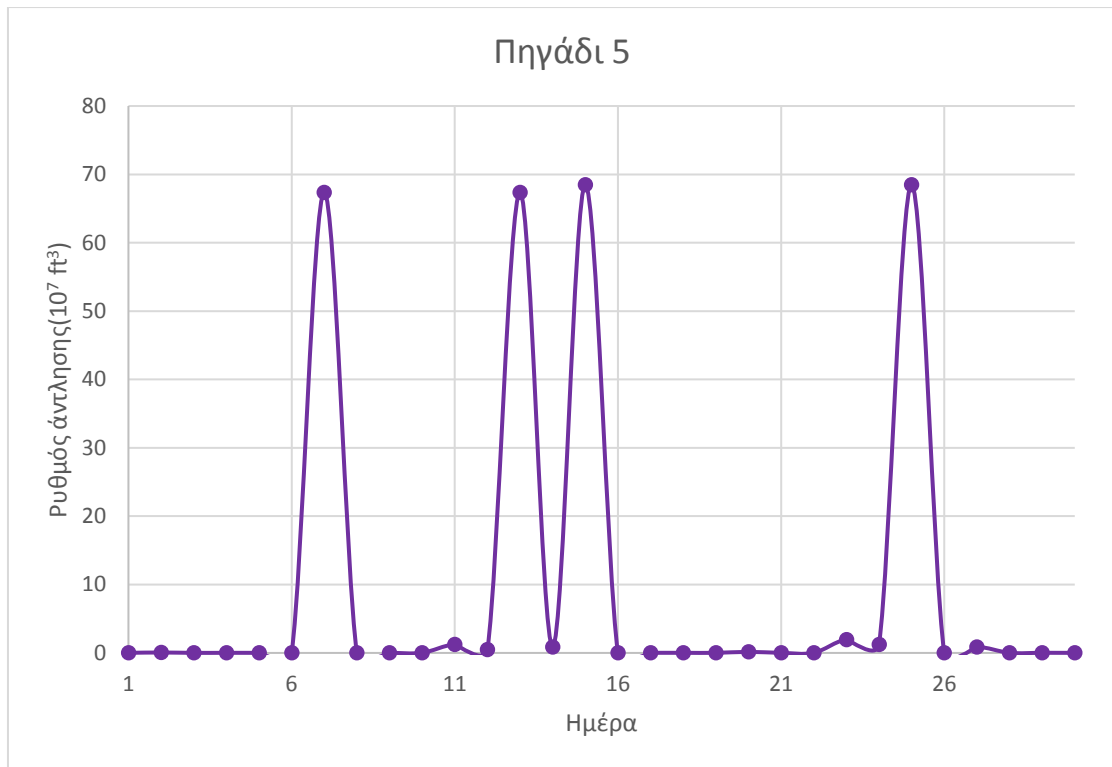
Σχήμα 4-14: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 2.



Σχήμα 4-15: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 3.

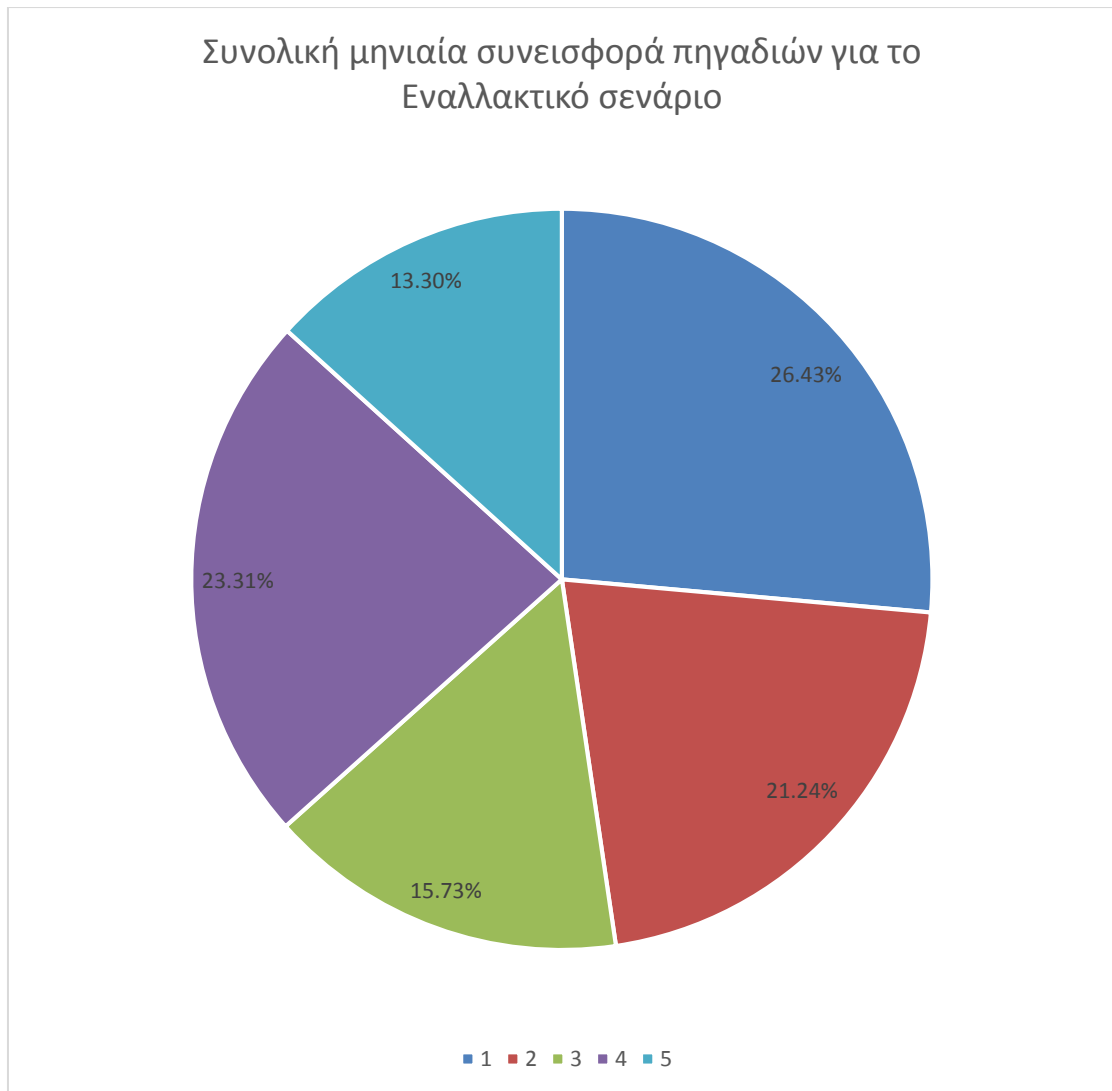


Σχήμα 4-16: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 4.



Σχήμα 4-17: Διάγραμμα ρυθμού άντλησης εναλλακτικού σεναρίου για το Πηγάδι 5.

Επιλέγοντας ίδιους συντελεστές κέρδους για όλα τα πηγάδια παρατηρείται πως ο μεγαλύτερος όγκος της άντλησης του φυσικού αερίου από τη δεξαμενή πραγματοποιείται από τα πηγάδια 1, 2 και 3. Τα τρία αυτά πηγάδια είναι και αυτά που βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους όπως σχεδιάστηκε το υπολογιστικό μοντέλο. Συνολικά, βέβαια, στο εναλλακτικό σενάριο που υπάρχουν ίδιοι συντελεστές κέρδους, η άντληση φυσικού αερίου πραγματοποιείται με σαφώς πιο μοιρασμένο τρόπο σε όλα τα πηγάδια σε σχέση με το βασικό σενάριο που εξετάστηκε. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται στο Σχήμα 4-18 που παρουσιάζει την μηνιαία συνεισφορά των πηγαδιών για το εναλλακτικό σενάριο.

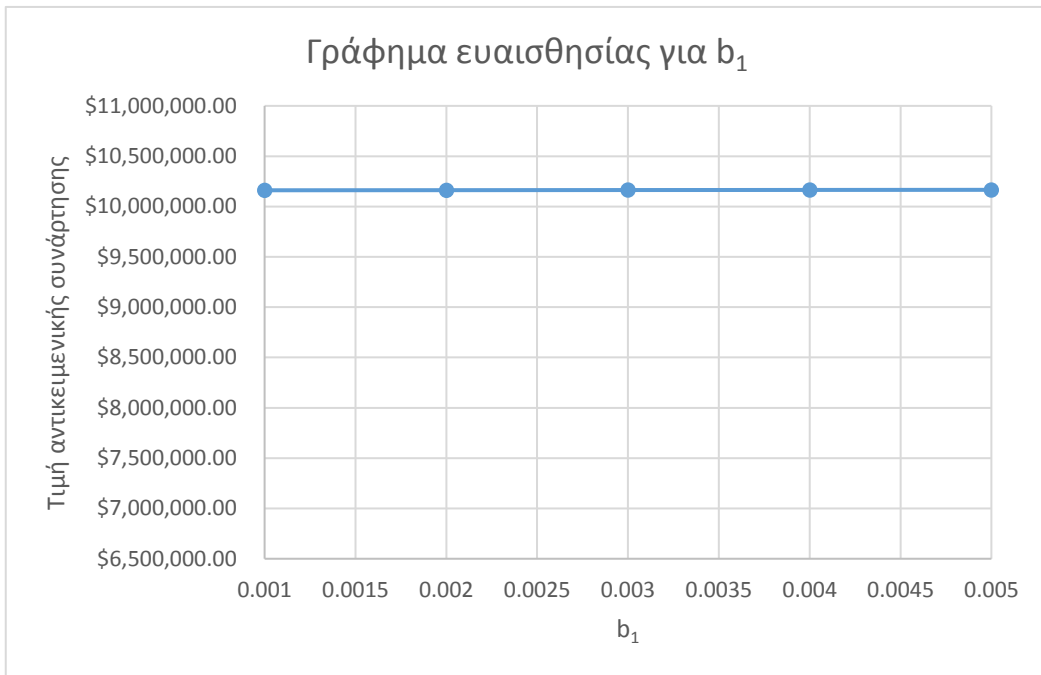


Σχήμα 4-18:Συνολική μηνιαία συνεισφορά πηγαδιών για το Εναλλακτικό σενάριο.

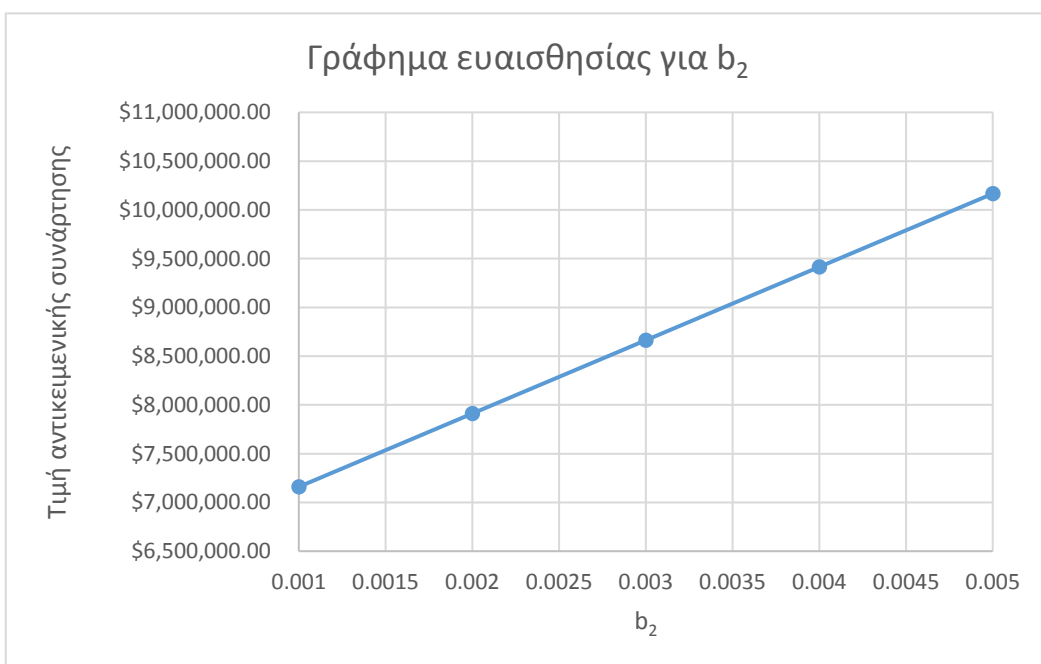
4.5 Ανάλυση ευαισθησίας

Προκειμένου να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην παρούσα μελέτη, διεξήχθη ανάλυση ευαισθησίας πάνω στο σενάριο του μηνιαίου προγραμματισμού. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκαν αρχικά ίδιοι συντελεστές κέρδους σε όλα τα πηγάδια και ίσοι με 0,005 \$/ft³. Επιδιωκόμενος σκοπός ήταν η μελέτη της επίδρασης καθενός πηγαδιού στην αντικειμενική συνάρτηση με βάση τον συντελεστή κέρδους του. Επομένως, για κάθε πηγάδι επιλέχθηκε διαφορετική τιμή συντελεστή κέρδους που μεταβαλλόταν από 0,001 \$/ft³ έως 0,005 \$/ft³ ενώ ταυτόχρονα τα υπόλοιπα πηγάδια διατηρούσαν σταθερό τον συντελεστή τους. Με την βοήθεια του Excel προέκυψαν τα παρακάτω Σχήματα 4-19 έως 4-23 που

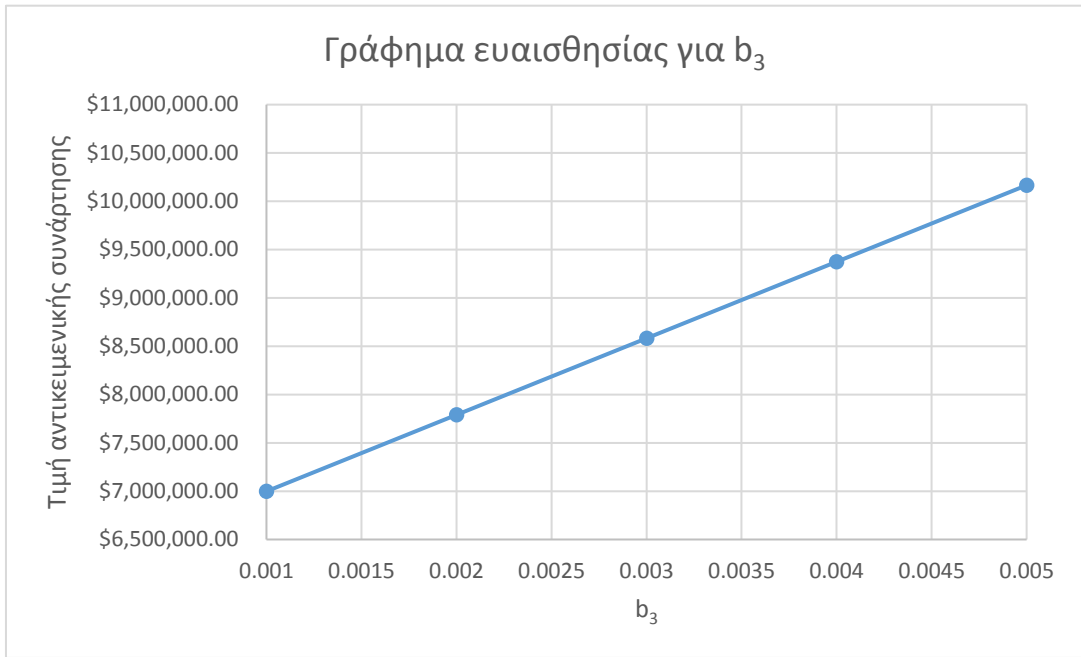
περιγράφουν τα γραφήματα ευαισθησίας για τις διάφορες τιμές συντελεστή κέρδους σε κάθε πηγάδι.



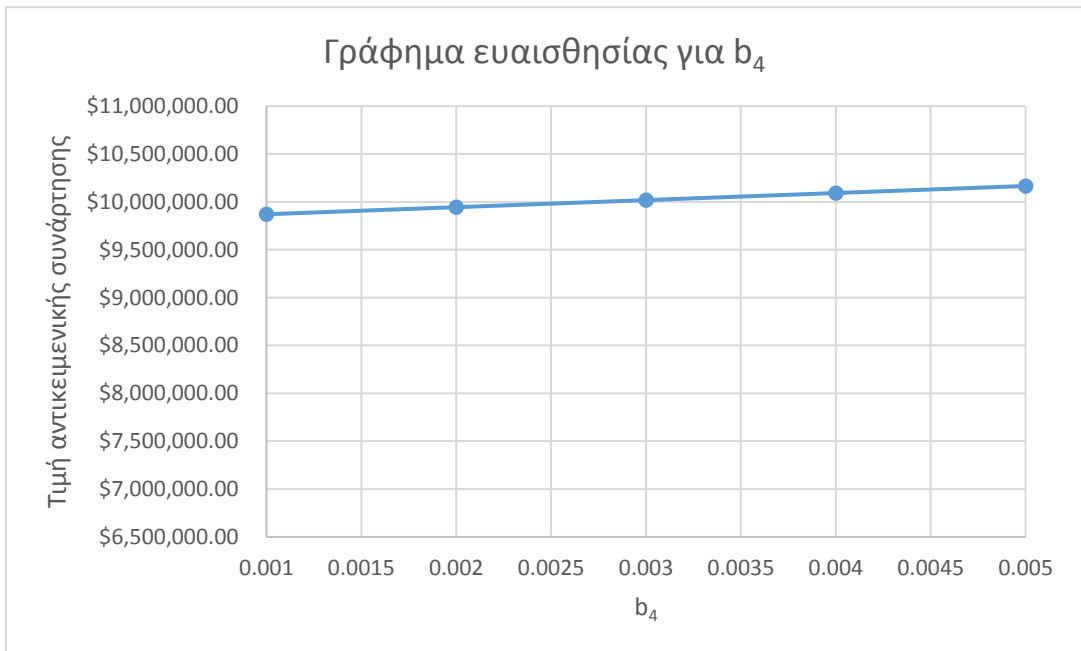
Σχήμα 4-19: Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_1 .



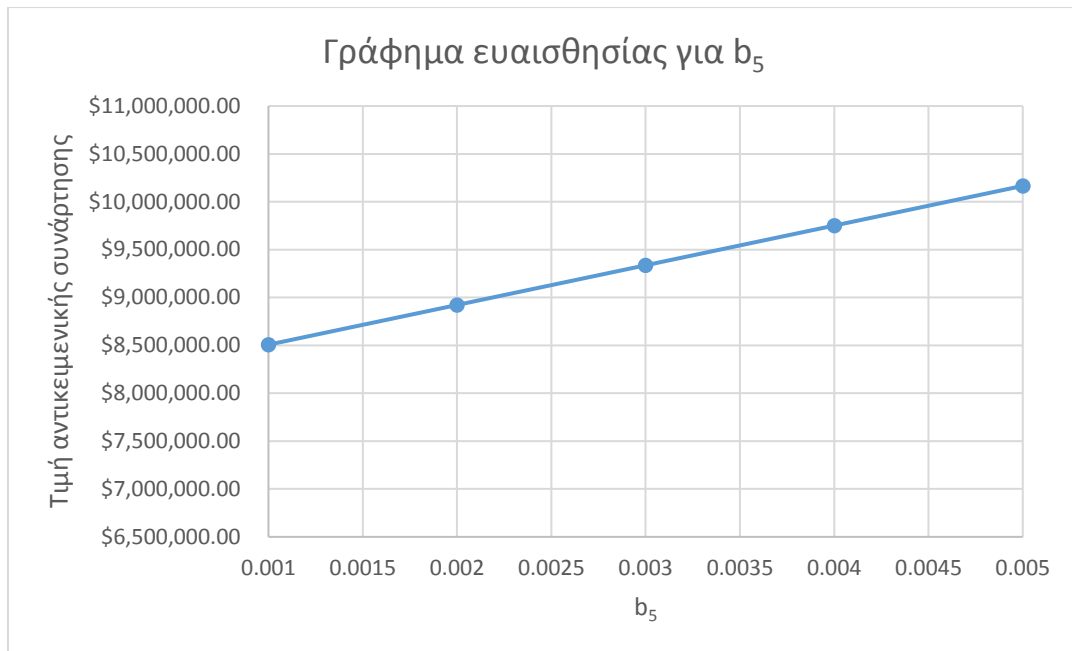
Σχήμα 4-20: Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_2 .



Σχήμα 4-21: Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_3 .



Σχήμα 4-22: Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b_4 .



Σχήμα 4-23:Γράφημα ευαισθησίας για συντελεστή κέρδους b₅.

Από τα παραπάνω γραφήματα ευαισθησίας καθίσταται πλέον φανερή η επίδραση κάθε πηγαδιού στο αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης. Φαίνεται καθαρά, όπως προέκυψε και από τα προηγούμενα αποτελέσματα της μελέτης, πως την μικρότερη επίδραση στο συνολικό κέρδος την ασκεί το πηγάδι 1. Παρατηρούνται πολύ μικρές αποκλίσεις της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για τις διάφορες τιμές του συντελεστή κέρδους του. Μικρή επίδραση έχει και το πηγάδι 4 που όπως αναλύθηκε και στο υπολογιστικό μοντέλο είναι τοποθετημένο σχετικά μακριά από τα υπόλοιπα στην επιφάνεια της δεξαμενής. Σαφώς μεγαλύτερη επιρροή ασκούν τα υπόλοιπα πηγάδια 1,2 και 5 όπως φαίνεται και από την κλίση της ευθείας που σχηματίζουν τα γραφήματά τους. Φαίνεται πως ακόμα και μία μικρή αλλαγή στον συντελεστή κέρδους τους, μπορεί να επιφέρει σημαντικές αυξήσεις ή μειώσεις στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

4.6 Ορθότητα-Εγκυρότητα αποτελεσμάτων

Για την βεβαιότητα της ορθότητας των αποτελεσμάτων, το πρόβλημα επαληθεύθηκε και με την χρήση του Excel Solver. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για 5 πηγάδια και 1 ή 2 χρονικές περιόδους, και ο Solver έδωσε αποτελέσματα πολύ κοντινά με αυτά της Matlab. Οι αποκλίσεις του ήταν πολύ μικρές που οφείλονταν κυρίως στα κριτήρια σύγκλισης των δύο μεθόδων. Στον Πίνακα 5-1 παρατίθενται δύο ενδεικτικά αποτελέσματα του αλγόριθμου ga αλλά και του Excel Solver, που υποδεικνύουν την ομοιότητα των αποτελεσμάτων και στην ουσία επιβεβαιώνουν την ορθότητα της δομής του αλγορίθμου στην Matlab. Το πρόβλημα δεν μπορούσε να λυθεί εξ ολοκλήρου για το βασικό σενάριο στον Excel Solver καθώς ο Solver δέχεται μέχρι 200 μεταβλητές απόφασης και 100 περιορισμούς, ενώ το σενάριο προς μελέτη ξεπερνούσε κατά πολύ αυτόν τον αριθμό.

Πίνακας 4-8: Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις δύο μεθόδους.

Σενάριο	Συνάρτηση ga Matlab	Excel Solver
5 πηγάδια-1 χρονική περίοδος	\$ 149.990,00	\$146.491,90
5 πηγάδια-2 χρονικές περίοδοι	\$ 299.640,00	\$299.997,89

5 Συμπεράσματα

Στο παρών κεφάλαιο πραγματοποιείται η καταγραφή των συμπερασμάτων που εξάγονται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο κεφάλαιο 5. Τα συμπεράσματα αυτά κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Συμπεράσματα ως προς το μαθηματικό μοντέλο
- Συμπεράσματα ως προς τη μέθοδο βελτιστοποίησης
- Συμπεράσματα ως προς τη φυσική σημασία των αποτελεσμάτων.

5.1 Συμπεράσματα ως προς το μαθηματικό μοντέλο

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την αναζήτηση του βέλτιστου προγραμματισμού άντλησης φυσικού αερίου σε μία δεξαμενή είχε σαν βασικό κριτήριο την εύρεση του μέγιστου κέρδους με ταυτόχρονη ικανοποίηση των περιορισμών.

Το μοντέλο αυτό, περιγράφει το πρόβλημα μέσω μεικτού ακεραίου προγραμματισμού, καθώς αποτελεί γραμμικοποίηση ενός μη-γραμμικού μοντέλου που προκαλεί μεγάλες μαθηματικές και υπολογιστικές δυσκολίες. Παρόλο που το μοντέλο αυτό αποτελεί κατά κάποιο τρόπο απλοποιημένη μορφή του προβλήματος, είναι σε θέση να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε σαφώς λιγότερο χρόνο από αντίστοιχα μη-γραμμικά και πιο πολύπλοκα μοντέλα. Άλλωστε είναι συχνό φαινόμενο να προτιμώνται γραμμικοποιημένες μορφές μη-γραμμικών προβλημάτων για επίλυση, καθώς με αυτόν τον τρόπο μειώνεται τόσο το υπολογιστικό κόστος, όσο και η πολυπλοκότητα.

5.2 Συμπεράσματα ως προς τη μέθοδο βελτιστοποίησης

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε η συνάρτηση ga του Optimization Toolbox του περιβάλλοντος της Matlab. Ο γενετικός αυτός αλγόριθμος είναι σε θέση να επιλύει προβλήματα μεικτού ακεραίου προγραμματισμού όπως αυτό της παρούσας μελέτης, σε σχετικά μικρό χρόνο και με ασφαλή αποτελέσματα, με περιορισμένο τον κίνδυνο εγκλωβισμού σε κάποιο τοπικό ελάχιστο. Η ga σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατάφερε να εξασφαλίσει την σύγκλιση ανεξάρτητα του αυξημένου ή όχι αριθμού μεταβλητών απόφασης. Οι λύσεις που σημειώθηκαν, προέκυψαν με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και ικανοποίηση των κριτηρίων σύγκλισης.

Η πραγματοποίηση περισσότερων επαναλήψεων πιθανόν να οδηγούσε σε περαιτέρω βελτίωση των λύσεων αλλά ταυτόχρονα θα οδηγούσε σε αύξηση του υπολογιστικού κόστους και χρόνου. Ο αριθμός απογόνων και γενεών που επιλέχθηκαν, αλλά και οι υπόλοιποι παράμετροι της μεθόδου που ορίστηκαν, επηρεάζουν την πορεία σύγκλισης, το υπολογιστικό κόστος αλλά και την ποιότητα της λύσης. Για την βεβαιότητα της ορθότητας των αποτελεσμάτων, το πρόβλημα επαληθεύθηκε, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως και με την χρήση του Excel Solver.

5.3 Συμπεράσματα ως προς τη φυσική σημασία των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4 φαίνεται να είναι άκρως ρεαλιστικά. Δημιουργήθηκε μια υποθετική δεξαμενή φυσικού αερίου που αντλείται ταυτόχρονα από 5 πηγάδια και μελετήθηκε ως προς κυρίως το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η άντληση.

Είναι πιο σωστό να κατηγοριοποιηθούν τα συμπεράσματα για τα αποτελέσματα των υπολογισμών σε δύο ομάδες ως εξής:

- Συμπεράσματα για 5 πηγάδια και 1 ή 2 χρονικές περιόδους
- Συμπεράσματα για το βασικό και το εναλλακτικό σενάριο της μελέτης

Συμπεράσματα για 5 πηγάδια και 1 ή 2 χρονικές περιόδους

Οι αρχικές δοκιμές περιλάμβαναν την άντληση μέσω 5 πηγαδιών για 1 χρονική περίοδο των οποίων τα αποτελέσματα έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Το πηγάδι 1 το οποίο διαθέτει τον μικρότερο συντελεστή κέρδους, δεν αξιοποιείται καθόλου στην διαδικασία της άντλησης. Φαίνεται, λοιπόν, πως όταν υπάρχει άντληση για μία μόνο χρονική περίοδο, κύρια στρατηγική του μοντέλου αποτελεί η άντληση από τα πηγάδια με τους μεγαλύτερους συντελεστές κέρδους. Για αυτό και τα πηγάδια 4 και 5 που διαθέτουν τους μεγαλύτερους συντελεστές κέρδους αντλούν το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγωγής.
- Το πηγάδι 3 έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά στην άντληση του φυσικού αερίου από την συγκεκριμένη δεξαμενή με μέσο ποσοστό συνεισφοράς 53,40 %. Το

πηγάδι αυτό όπως σχεδιάστηκε η θέση των πηγαδιών, βρίσκεται γεωγραφικά στο “μέσο” όλων των πηγαδιών και πολύ κοντά στα πηγάδια 1,2,5. Φαίνεται, λοιπόν, η σημασία που έχει η γεωγραφική τοποθέτηση των πηγαδιών για την παραγωγή και το πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα μητρώα επιρροής που επηρεάζονται από την απόσταση μεταξύ των πηγαδιών.

- Η συνολική άντληση δεν ξεπερνάει σε καμία δοκιμή την ζήτηση, ικανοποιώντας έτσι τον περιορισμό που έχει τεθεί. Σε κάποιες δοκιμές είναι ακριβώς ίση με την ζήτηση, ενώ σε άλλες δοκιμές είναι ελάχιστα μικρότερη. Στην περίπτωση που υπάρχει λίγο μικρότερη παραγωγή, ο διαχειριστής της δεξαμενής προκειμένου να εξυπηρετήσει την ζήτηση, θα στρεφόταν στα αποθέματα που διατηρούν πάντα οι δεξαμενές, ώστε να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν γεγονότα όπως αυτό.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν 7 δοκιμές για τα ίδια 5 πηγάδια αλλά για 2 χρονικές περιόδους και εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- Παρατηρείται πως και για τις δοκιμές για 2 χρονικές περιόδους, το πηγάδι 1 με τον μικρότερο συντελεστή κέρδους έχει ελάχιστη συμμετοχή στη διαδικασία άντλησης. Σε όλες τις δοκιμές, κατά την 1^η χρονική περίοδο δεν αντλεί, ενώ κατά την 2^η συμμετέχει σε μικρό βαθμό. Συνεχίζουν, λοιπόν, ακόμα και για 2 χρονικές περιόδους να υπερτερούν σε συνεισφορά τα πηγάδια με τους μεγαλύτερους συντελεστές κέρδους.
- Τα πηγάδια 3 και 4 συνεχίζουν να υπερτερούν σε συνεισφορά έναντι των υπολοίπων, αλλά κυρίως για την 1^η περίοδο. Σε αυτό το παράδειγμα γίνεται φανερό το πώς αρχίζει να αλλάζει το πρόγραμμα παραγωγή όταν υπάρχουν παραπάνω από μία χρονικές περιόδους.

Συμπεράσματα για το βασικό και το εναλλακτικό σενάριο μελέτης

Τόσο το βασικό όσο και το εναλλακτικό σενάριο μελέτης περιλάμβαναν τον μηνιαίο προγραμματισμό παραγωγής στην δεξαμενή με τα 5 πηγάδια. Η διαφοροποίηση των σεναρίων έγκειται στο γεγονός ότι στο εναλλακτικό σενάριο επιλέχθηκαν ίδιοι συντελεστές κέρδους ώστε να μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής αυτής στο μοντέλο.

Για το βασικό σενάριο παρατηρήθηκε ότι:

- Τον κύριο όγκο άντλησης διεξήγαγαν τα πηγάδια 2,3 και 5. Το πηγάδι 1 με τον μικρότερο συντελεστή κέρδους αλλά και το πηγάδι 4 που είναι το πιο απομακρυσμένο στην επιφάνεια της πηγής συμπεριφέρθηκαν περισσότερο ως "υποστηρικτικά" στην παραγωγή, αντλώντας σε λίγες χρονικές περιόδους. Αυτό φαίνεται καθαρά στα διαγράμματα ρυθμού άντλησης που παρατίθενται στο κεφάλαιο 4.3. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, πως στο σενάριο που περιλαμβάνει πολλές χρονικές περιόδους, τόσο οι συντελεστές κέρδους, δηλαδή η κερδοφορία του κάθε πηγαδιού, όσο και η θέση του στην επιφάνεια της δεξαμενής διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην διαδικασία και τον προγραμματισμό της άντλησης.

Για το εναλλακτικό σενάριο παρατηρήθηκε ότι:

- Η άντληση είναι σαφώς πιο μοιρασμένη σε όλα πηγάδια. Έχοντας ίδιους συντελεστές κέρδους σε όλα τα πηγάδια, ο κύριος όγκος άντλησης μοιράζεται στα πηγάδια 1,2,3 που βρίσκονται γειτνιάζουν, αλλά ενεργό ρόλο διαδραματίζουν και τα 5 πηγάδια.
- Τόσο στο εναλλακτικό όσο και στο βασικό σενάριο, ο περιορισμός της ζήτησης ικανοποιείται, καθώς σε καμία χρονική περίοδο η συνολική άντληση δεν ξεπερνά την ζήτηση. Σε κάποιες χρονικές περιόδους που η συνολική άντληση είναι ελαφρά χαμηλότερη από την ζήτηση, ο διαχειριστής της δεξαμενής θα αναγκαστεί να χρησιμοποιήσει από τα διαθέσιμα αποθέματά του.

Τελικά, όπως προέκυψε από όλες τις δοκιμές σε όλα τα σενάρια, το μαθηματικό μοντέλο που επιλέχθηκε επιβεβαιώνει τη σημασία που διαδραματίζει στην διαδικασία της άντλησης, τόσο η γεωμετρία και η θέση του κάθε πηγαδιού, όσο και η κερδοφορία του και το κόστος παραγωγής σε κάθε πηγάδι.

Βέβαια, το παρών μαθηματικό μοντέλο διαθέτει κάποια μειονεκτήματα που εξηγούνται στο κεφάλαιο 2, τα οποία καλύπτονται από άλλα διαθέσιμα μοντέλα βελτιστοποίησης, που όμως με τη σειρά τους διαθέτουν άλλα μειονεκτήματα, πιθανώς ίδιας ή και υψηλότερης βαρύτητας. Το σημαντικό είναι όμως, πως με εργαλείο το παρών μαθηματικό μοντέλο, ο διαχειριστής μίας δεξαμενής φυσικού αερίου είναι σε θέση να λάβει σημαντικά στοιχεία σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας της δεξαμενής και κυρίως είναι σε θέση να δομήσει ένα πρόγραμμα παραγωγή που θα του αποφέρει το μέγιστο δυνατό κέρδος.

6 Κατάλογος βιβλιογραφικών αναφορών

Arianson, M., 2008, “*Well Models for Production Optimization*”, Norwegian University of Science and Technology, Oslo.

Bangerth, W., Klie, H., Wheller, M. F., Stoffa, P. L. and Sen, M. K., 2006, “On optimization algorithms for the reservoir oil well placement problem”, *Computational Geosciences* vol.10 (3), pp. 303-319.

Brown, K., Thronson, L., Manal, T., Onderka, V., Wallbrecht, J., Zangl, G., 2008, “Intelligent well technology in underground gas storage”, *Journal of Petroleum Science and Engineering* vol 15, pp, 302-316.

Brown, G. G., Avery, W., Rosenbranz, J.A. and Wood, R. K., 1992, *Optimization of Purchase, Storage and Transmission Contracts for Natural Gas Utilities*, Operations Research, vol. 40(3), pp. 446-462.

BP, 2017, *BP Statistical Review of World Energy 2017*, viewed in 15 April 2017 <<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>

Chaudhry, A. U., 2003, “*Gas Well Testing Handbook*”, GPP, Houston.

Flanigan, O., 1995, “*Underground Gas Storage Facilities: Design Implementation*”, Elsevier Science & Technology Books, New York.

Goldberg, D., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, Reading.

Hummer, D. J., 1968, “*The optimization of gas withdrawal rates from single well and multi well reservoirs*”, Oklahoma State University, Oklahoma.

Jang, H. and Lee, J., 2015, “Effect of fracture design parameters on the well performance in a hydraulically fractured shale gas reservoir”, *Energy Exploration & Exploitation* vol. 33(2), pp. 157-168.

Joines, J. and Houck, C., 1994. *On the use of nonstationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GAs*, in IEEE International Conference Evolutionary Computing, Piscataway, pp. 579-584.

Lyons, W. L., Plisga, G. J. and Lorenz, M. D., 2016, "*Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*", GPP, Houston.

MathWorks, 2017, *How the Genetic Algorithm Works*, viewed 5 March 2017 <<https://www.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html>>

MathWorks, 2017, *Find minimum of function using genetic algorithm*, viewed 7 March 2017 <<https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html>>

Mokhatab, S., Poe, W. A. and Mak, J. Y., 2015, "*Handbook of Natural Gas Transmission and Processing-Principles and Practices*", GPP, Houston.

Murray, J. and Edgar, T., 1978, "Optimal Scheduling of Production and Compression in Gas Fields", *Journal of Petroleum Technology* vol.30, pp. 109-116.

Nasrabaldi, H., Morales, A. and Zhu, D., 2012, "Well placement optimization: A survey with special focus on application for gas/gas-condensate reservoirs", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* vol. 5, pp.6-16.

Natural Gas Organization, 2015, *Natural Gas-From wellhead to Burner Tip*, viewed in 20 April 2017 < <http://naturalgas.org/naturalgas/extraction/>>

Natural Gas Organization, 2015, *Well Completion*, viewed in 20 April 2017, < <http://naturalgas.org/naturalgas/well-completion/#wellhead>>

Oil & Gas Journal, 2014, *Worldwide look at Reserves and Production*, viewed in 25 April 2017 <<http://www.ogj.com/articles/print/volume-112/issue-1/drilling-production/worldwide-look-at-reserves-and-production.html>>

Panapakidis, I. P. and Dagoumas, A. S., 2016, *Day-ahead natural gas demand forecasting based on the combination of wavelet transform and ANFIS/genetic algorithm/neural network model*, *Energy* vol.118, pp.231-245.

Rahim, S. and Li, Z. , 2015, "Well placement Optimization with Geological Uncertainty Reduction", proceedings of the 9th *International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes*, Whistler, British Columbia, Canada.

Rios-Mercado, R. and Borraz-Sanchez, C., 2015, "Optimization problems in natural gas transportation systems: state-of-the-art review", *Applied Energy* vol.147, pp. 536-555.

Runarsson, T.P. and Yiao, X., 2002. *Constrained Evolutionary Optimization: the penalty function approach*, Kluwer Academic Publishers, USA.

Satter, A., Iqbal, G. M. and Buchwalter, J. L., 2008, "*Practical Enhanced Reservoir Engineering*", PennWell, Oklahoma.

Tian, L., Xiao, C., Liu, M., Gu, D., Song, G. and Cao, H., 2014, *Well testing model for multi-fractured horizontal well for shale gas reservoirs with consideration of dual diffusion in matrix*, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* vol.21, pp.283-295.

U.S. Energy Information Administration,2015, *The Basics of Underground Natural Gas Storage*, viewed 15 April 2017, < <https://www.eia.gov/naturalgas/storage/basics/>>

U.S. Energy Information Administration,2017, *United States Natural Gas Industrial Price*, viewed 25 April 2017 <<https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/n3035us3m.htm>>

Wattenbarger, R. A., 1970, *Maximizing Seasonal Withdrawal from Gas Storage Reservoir*, *SPE Journal of Petroleum Technology* vol.22, pp.994-998.

Xue, J., Li, N., Lu, X., Zhang, S. and Wang, Y., 2017, *Productivity model for gas reservoirs with open-hole multi-fracturing horizontal wells and optimization of hydraulic fracture parameters*, *Petroleum* vol. 30, pp.1-7.

Zheng, Q., Rebennack, S., Iliadis, N. and Pardalos, P., 2010, "Optimization Models in The Natural Gas Industry" in *Handbook of Power Systems I*, Springer, New York, pp. 121-148.