



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Σχεδιασμός κατευθυνόμενων γεωτρήσεων υδρογονανθράκων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σπηλιωτάκου Χαράλαμπου

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Σταματάκη Σοφία, Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Σχεδιασμός κατευθυνόμενων γεωτρήσεων υδρογονανθράκων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σπηλιωτάκου Χαράλαμπου

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις __/__/2018

.....

.....

.....

Σταματάκη Σοφία

Αποστολόπουλος Γεώργιος

Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος

Καθηγήτρια, ΕΜΠ

Αναπληρωτής Καθηγητής, ΕΜΠ

Αναπληρωτής Καθηγητής, ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας που αφορά την δημιουργία ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή εκ του μηδενός, απαιτούσε την καθοδήγηση ειδημόνων στον τομέα των κατευθυνόμενων γεωτρήσεων. Αυτή η καθοδήγηση και επίβλεψη έγινε τόσο από την Καθηγήτριά κα Σοφία Σταματάκη η οποία μου προσέφερε σημαντική βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης, όσο και από την κα Ειρήνη Δημητρέλλου όπου βοήθησε σημαντικά για την επίλυση κάθε απορίας που μπορεί να προέκυπτε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μανώλη Παπαδόπουλο ο οποίος, με τις γνώσεις του στον προγραμματισμό κατάφερε να με βοηθήσει να λύσω σημαντικά τεχνικά προβλήματα που αντιμετώπιζα και συνέβαλε αισθητά στην επαύξηση της λειτουργικότητας του λογισμικού.

Σπηλιωτάκος Χαράλαμπος

Οκτώβριος 2018

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό της τροχιάς κατευθυνόμενων γεωτρήσεων και τον προσδιορισμό/έλεγχο της πραγματικής πορείας τους κατά τη φάση της διάτρησης. Η εργασία επικεντρώνεται σε κεκλιμένες γεωτρήσεις τύπου Build and Hold. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε λογισμικό σε πλατφόρμα Visual Studio 2017 της Microsoft με γλώσσα προγραμματισμού την Visual Basic. Το λογισμικό εξυπηρετεί τους παρακάτω βασικούς στόχους:

1. Τον σχεδιασμό κεκλιμένων γεωτρήσεων τύπου Build and Hold καθώς και τον υπολογισμό των βασικών γεωμετρικών παραμέτρων της τροχιάς στο κατακόρυφο και το οριζόντιο επίπεδο.
2. Τη διδιάστατη αποτύπωση της τροχιάς γεωτρήσεων τύπου Build & Hold
3. Τον προσδιορισμό της πραγματικής τροχιάς αυτού του τύπου γεωτρήσεων κατά τη φάση της διάτρησης με βάση δεδομένα μετρήσεων σε σημεία (σταθμούς), τον έλεγχο της ορυσσόμενης γεώτρησης σε σχέση με την σχεδιασθείσα και την έγκαιρη ρύθμιση της ορυσσόμενης γεώτρησης με στόχο την άμβλυνση τεχνικών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν στην πράξη.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η τεχνολογία των κατευθυνόμενων γεωτρήσεων, το πεδίο εφαρμογής τους, καθώς και ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την πρόσδωση της επιθυμητής παρέκκλισης της γεώτρησης. Στο ίδιο κεφάλαιο δίδονται οι βασικοί τύποι της τροχιάς κεκλιμένων γεωτρήσεων και ορίζονται οι γεωμετρικές παράμετροι αυτών.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται αναλυτικά ο θεωρητικός σχεδιασμός της τροχιάς γεωτρήσεων τύπου Build & Hold επί του κατακόρυφου και οριζόντιου επιπέδου και παρουσιάζονται με συστηματικό τρόπο όλες οι αναλυτικές τριγωνομετρικές σχέσεις που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των βασικών μεγεθών και παραμέτρων της τροχιάς.

Το Κεφάλαιο 3 πραγματεύεται τον τρόπο και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της πραγματικής διάτρησης μια κεκλιμένης γεώτρησης μέσω μετρήσεων κλίσης και αζιμούθιου επί σημείων σταθμών. Παρουσιάζονται επίσης οι μεθοδολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν ώστε να υπολογίζεται στο χώρο η θέση κάθε σημείου της πραγματικής τροχιάς και να επιτυγχάνεται η ακριβής αποτύπωση των διατρυθέντων τμημάτων της με βάση τις μετρήσεις επί κάθε σημείου - σταθμού.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η ανάπτυξη του λογισμικού για το σχεδιασμό γεωτρήσεων τύπου Build & Hold καθώς και για τον προσδιορισμό, έλεγχο και αποτύπωση της

πραγματικής τροχιάς κατά τη διάτρηση. Δίδονται αναλυτικά όλες οι λειτουργίες του προγράμματος που έχει αναπτυχθεί συνοδευόμενες από σειρά εφαρμογών ώστε να δίδεται η δυνατότητα κατανόησης τους .

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς επίσης και οι προτάσεις για περαιτέρω ενίσχυση των δυνατοτήτων του λογισμικού.

Abstract

This work contributes to the design of directional wells trajectory and to the definition and control of the actual well path, while drilling. The thesis focuses on build and hold type of directional wells. To this purpose, a Microsoft Visual Studio 2017 platform software was developed with Visual Basic programming language. The software serves the following key goals:

1. The design of inclined boreholes of Build and Hold type and the calculation of the basic geometric parameters of the trajectory on the vertical and horizontal plane.
2. The two-dimensional (2D) mapping of the trajectory of the Build and Hold type wells.
3. The determination of the actual well path for this type of directional wells while drilling, based on specific survey stations measurements, as well as the control of the actual trajectory when drilling in relation to the planned one and the adjustments to mitigate potential technical practical problems.

Chapter 1 presents the technology of directional drilling, and the fields of its application, as well as the basic equipment that is used to deliver the desired trajectory deviation. Furthermore, the basic trajectory types of directional wells are also presented in this chapter, and their geometric parameters are fully defined.

Chapter 2 presents in detail the theoretical design of the trajectory of Build and Hold type wells, on the vertical and horizontal plane. It also presents in a systematic manner all the analytical trigonometric equations required to determine the basic trajectory parameters.

Chapter 3 deals with the methods and equipment used to monitor and control the actual trajectory of a directional well while drilling, through measurements of actual inclination and azimuth angles at survey stations. It also presents the methodologies that can be used to calculate the location of each point of the actual trajectory and to achieve the accurate mapping of the borehole trajectory that is already drilled, based on the measurements at each survey station.

Chapter 4 presents the development of the software for the design of the Build and Hold trajectory of a directional well, as well as for the identification, control and mapping of the actual trajectory during drilling. All the functions of the program that have been developed,

together with a number of applications, are given in detail so that they can be well understood.

Finally, Chapter 5 presents the conclusions of this diploma thesis, as well as recommendations for future enhancement of the capabilities of the software that has been developed in the frame of this work.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΚΑΙ ΚΕΚΛΙΜΕΝΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ.....	1
1.1. Ιστορικά στοιχεία.....	1
1.2. Εφαρμογές κεκλιμένων – οριζόντιων γεωτρήσεων.....	3
1.2.1. Ανάπτυξη υποθαλάσσιων κοιτασμάτων.....	3
1.2.2. Κοιτάσματα σε δυσπρόσιτες περιοχές ή περιοχές όπου υφίστανται ειδικοί περιορισμοί.....	4
1.2.3. Διάτρηση γύρω από δόμο άλατος.....	5
1.2.4. Περιπτώσεις ατυχημάτων κατά τη διάτρηση.....	5
1.2.5. Διάτρηση υπό εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες.....	6
1.2.6. Έρευνα περιοχών ευρείας έκτασης.....	6
1.2.7. Ανάπτυξη "οριακών" ή "φτωχών" κοιτασμάτων με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας και του τελικού ποσοστού απόληψής τους.....	8
1.3. Βασική ορολογία – γεωμετρικοί παράμετροι τροχιάς.....	9
1.4. Τύποι κατευθυνόμενων γεωτρήσεων.....	16
1.4.1. Οριζόντιες Γεωτρήσεις.....	16
1.4.2. Διακλαδιζόμενες – πολλαπλές (<i>Multilateral</i>) γεωτρήσεις.....	18
1.4.3. Κεκλιμένες γεωτρήσεις εκτεταμένης οριζόντιας μετατόπισης <i>Extended Reach Drilling (ERD)</i>	20
1.5. Βασικοί τύποι τροχιάς.....	20
1.5.1. Τύπος I Τροχιά ευθείας παρέκκλισης (<i>slant type</i> ή <i>build-and-sail type</i> ή <i>build-and-hold type</i>).....	21
1.5.2. Τύπος II Τροχιά τύπου S (<i>S-type</i> ή <i>build-sail and drop type</i> ή <i>build-hold and drop type</i>).....	21
1.5.3. Τύπος III Τροχιά τύπου J ή τύπου L (<i>J-type</i> ή <i>L-type</i>).....	22
1.6. Όργανα πρόσδωσης παρέκκλισης.....	22
1.6.1. Σφήνες.....	23

1.6.2.	Κοπτικά άκρα εκτόξευσης κυκλοφορούντων ρευστών (jetting bits)	25
1.6.3.	Αντίβαρα σταθερής ή μεταβλητής κλίσης και κινητήρες πυθμένα λάσπης ..	26
1.6.4.	Διατάξεις Bottom Hole Assembly (B.H.A.)	28
1.7.	Οικονομικά στοιχεία	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ		32
2.1.	Σχεδιασμός κατακόρυφης προβολής τροχιάς τύπου Build & Hold.....	32
2.1.1.	Θεωρητικός σχεδιασμός	32
2.1.2.	Υπολογισμός βασικών γεωμετρικών παραμέτρων τροχιάς στο κατακόρυφο επίπεδο X-Z.....	32
2.2.	Σχεδιασμός οριζόντιας προβολής τροχιάς τύπου Build & Hold	40
2.2.1.	Θεωρητικός σχεδιασμός τροχιάς με συνεχώς μεταβαλλόμενο αζιμούθιο	40
2.2.2.	Σχεδιασμός οριζόντιας προβολής σύνθετης τροχιάς με σταθερό και μεταβαλλόμενο αζιμούθιο.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΟΡΥΞΗ.....		48
3.1.	Εισαγωγή	48
3.2.	Εξοπλισμός πραγματοποίησης μετρήσεων κατά τη διάτρηση	49
3.2.1.	Εργαλεία μαγνητικών μετρήσεων	50
3.2.2.	Μετρήσεις κατά τη διάτρηση (Measurements While Drilling).....	52
3.2.3.	Γυροσκόπια.....	54
3.3.	Μέθοδοι προσδιορισμού τροχιάς.....	55
3.3.1.	Εφαπτομενική μέθοδος.....	56
3.3.2.	Εξισορροπημένη εφαπτομενική μέθοδος	57
3.3.3.	Μέθοδος του μέσου όρου	58
3.3.4.	Μέθοδος ακτίνας καμπυλότητας	59
3.3.5.	Μέθοδος ελάχιστης καμπυλότητας	60

3.3.6. Ένταση γωνίας Dog Leg (DLS)	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	
ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΤΥΠΟΥ BUILD & HOLD	64
4.1. Εισαγωγή	64
4.2. Σχεδιασμός κατακόρυφης προβολής της τροχιάς Build & Hold με τη χρήση του λογισμικού	65
4.2.1. Εφαρμογή 1	68
4.2.2. Εφαρμογή 2	72
4.2.3. Εφαρμογή 3	74
4.2.4. Παρατηρήσεις-Σχόλια	75
4.3. Σχεδιασμός οριζόντιας προβολής της τροχιάς Build & Hold με προκαθορισμένη στροφή επί του οριζοντίου επιπέδου X-Y, με τη χρήση λογισμικού.....	78
4.3.1. Εφαρμογή	79
4.4. Προσδιορισμός της τροχιάς κεκλιμένης γεώτρησης κατά τη διάτρηση με τη χρήση λογισμικού	81
4.4.1. Σύγκριση πραγματικής και σχεδιασθείσας τροχιάς.....	83
4.5. Οδηγώντας προς τον στόχο με προγραμματισμένο βηματισμό μεταβολής αζιμούθιου.....	83
4.5.1. Εφαρμογή 1	86
4.5.2. Πρόσθετες δυνατότητες.....	89
4.5.3. Παρατηρήσεις.....	89
4.5.4. Εφαρμογή 2	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	100

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 : Η εξέλιξη της κατευθυνόμενης διάτρησης	2
Εικόνα 1.2 : Διάτρηση πολλαπλών γεωτρήσεων από πλατφόρμα (Carden, et al., 2007)	3
Εικόνα 1.3 : Κοίτασμα σε δυσπρόσιτη περιοχή (Carden, et al., 2007)	4
Εικόνα 1.4 Διάτρηση γύρω από δόμο άλατος (Carden, et al., 2007)	5
Εικόνα 1.5 : Πλευρική όρυξη για την παράκαμψη προβληματικού τμήματος της (Carden, et al., 2007)	6
Εικόνα 1.6 Διάτρηση μέσω ρήγματος Εικόνα 1.7 Διάτρηση βοηθητικής γεώτρησης (Carden, et al., 2007)	7
Εικόνα 1.8 Πολλαπλές κεκλιμένες γεωτρήσεις για την ανάπτυξη περιοχής μεγάλης έκτασης (Carden, et al., 2007)	8
Εικόνα 1.9 Οριζόντια γεώτρηση (Carden, et al., 2007).....	9
Εικόνα 1.10 : Αναπαράσταση τροχιάς κεκλιμένης γεώτρησης στον 3-διάστατο χώρο.....	10
Εικόνα 1.11 Επίδραση σκληρότητας σχηματισμών επί του προσανατολισμού του κοπτικού	14
Εικόνα 1.12 Παρουσία σκληρών φλεβών εντός μαλακών πετρωμάτων.....	15
Εικόνα 1.13 Διάτρηση παράλληλων στρώσεων με διαφορετικά χαρακτηριστικά.	15
Εικόνα 1.14 : Χρήση γωνίας οδήγησης του κοπτικού για την διόρθωση της τάσης για παρέκκλιση (<i>bit walk</i>).....	15
Εικόνα 1.15 : Ο σχηματισμός επιφάνειας επαφής μορφής «κώνου» μεταξύ πετρελαίου και των άλλων ρευστών γύρω από κατακόρυφο πηγάδι.	17
Εικόνα 1.16 : Ο σχηματισμός επιφάνειας επαφής μορφής «κώνου» μεταξύ πετρελαίου και των άλλων ρευστών γύρω από οριζόντιο πηγάδι.	17
Εικόνα 1.17 : Μία διακλαδιζόμενη γεώτρηση	19
Εικόνα 1.18 : Βασικοί τύποι τροχιάς (Mitchell, και συν., 2011)	21
Εικόνα 1.19 : Εφαρμογή γωνίας κλίσης ή πλευρικής τάσης επί του κοπτικού.....	23
Εικόνα 1.20 : Σταδιακή παρέκκλισης του κοπτικού από τον κατακόρυφο άξονα	24
Εικόνα 1.21 : Κινήσεις του κοπτικού για την έναρξη παρέκκλισης	25

Εικόνα 1.22 : Κοπτικά με ειδικά διαμορφωμένα ακροφύσια σε προσανατολισμό και μέγεθος	25
Εικόνα 1.23 : Διαδικασία πρόσδωσης παρέκκλισης μέσω κοπτικών άκρων εκτόξευσης κυκλοφορούντων ρευστών (Hossain, και συν., 2015).....	26
Εικόνα 1.24 : Αντίβαρο σταθερής κλίσης (αριστερά) (Ford, 2017), σύστημα οδήγησης γεώτρησης (δεξιά)	27
Εικόνα 1.25 : Τηλεχειριζόμενο αντίβαρο με κλίση.....	28
Εικόνα 1.26 : Τάσεις που ασκούνται επί της διάταξης B.H.A.	28
Εικόνα 1.27 : Διατάξεις κατώτερης συνδεσμολογίας διατρητικής στήλης (Ford, 2017)....	29
Εικόνα 1.28 : Κόστη κατακόρυφης, οριζόντιας και κεκλιμένης γεώτρησης	30
Εικόνα 1.29 Συγκριτικά κόστη κατακόρυφων και κεκλιμένων γεωτρήσεων σε σχέση με τη διάμετρο της γεώτρηση	30
Εικόνα 2.1 : Γεωμετρικά στοιχεία τροχιάς τύπου build and hold για $X3 < r1$	33
Εικόνα 2.2 : Γεωμετρικά στοιχεία τροχιάς τύπου build and hold	36
Εικόνα 2.3 : Η γεωμετρία του καμπυλόγραμμου τμήματος (Build up)	38
Εικόνα 2.4: Γεωμετρικά στοιχεία τροχιάς τύπου Build and Hold	39
Εικόνα 2.5 : Η γεωμετρία της τροχιάς γεώτρησης όπως προβάλλεται στο οριζόντιο επίπεδο (Mitchell, 1995).....	41
Εικόνα 2.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχικού τμήματος με σταθερό αζιμούθιο	45
Εικόνα 3.1 : Μαγνητική απόκλιση προς τα Δυτικά (-MA) (στα αριστερά) και Μαγνητική Απόκλιση προς τα Ανατολικά (στα δεξιά)	51
Εικόνα 3.2 : Μαγνητικό όργανο καταγραφής πολλαπλών μετρήσεων (Drilling Engineering, Institute of Petroleum Engineering, Heriot –Watt University).....	52
Εικόνα 3.3 Εξοπλισμός πραγματοποίησης μετρήσεων κατά την διάτρηση (Rabia, 2002). 53	
Εικόνα 3.4 Συμβατικό γυροσκόπιο (Rabia, 2002)	55
Εικόνα 3.5 Απεικόνιση τροχιάς με την εφαπτομενική μέθοδο	57
Εικόνα 3.6 Απεικόνιση τροχιάς με την εξισορροπημένη εφαπτομενική μέθοδο.....	58
Εικόνα 3.7 Απεικόνιση τροχιάς με την μέθοδο του μέσου όρου.	59

Εικόνα 3.8 Απεικόνιση τροχιάς με την μέθοδο ακτίνας καμπυλότητας.	60
Εικόνα 3.9 Απεικόνιση τροχιάς με την μέθοδο ελάχιστης καμπυλότητας.....	61
Εικόνα 3.10 Γωνία Dog Leg.....	62
Εικόνα 4.1 : Παράδειγμα υπολογισμού αζιμούθιου, οριζόντιας μετατόπισης και απεικόνιση οριζόντιας προβολής του στόχου	67
Εικόνα 4.2 : Σχεδιασμός τροχιάς.....	69
Εικόνα 4.3 : Υπολογισμός MD, HD και θ' για τροχιά 0 της Εικόνας 4.2.....	71
Εικόνα 4.4 : Υπολογισμός TVD, HD και θ' για τροχιά (0) της Εικόνας 4.2	71
Εικόνα 4.5 : Φόρμα υπολογισμού παραμέτρων ανά 5ft μετρούμενου βάθους και εξαγωγή στο excel.....	72
Εικόνα 4.6 : Σχεδιασμός εναλλακτικών τροχιών τύπου Build & Hold για την προσέγγιση του ίδιου στόχου με συνεχώς αυξανόμενη μέγιστη γωνία κλίσης	73
Εικόνα 4.7 : Σχεδιασμός εναλλακτικών τροχιών με συνεχώς αυξανόμενη γωνία μέγιστης κλίσης (θ) και ρυθμό αύξησης καμπυλότητας (BUR).....	75
Εικόνα 4.8 : Η ελάχιστη γωνία προσβολής του στόχου	76
Εικόνα 4.9: Η τροχιά της γεώτρησης για γωνία προσβολής 14°	77
Εικόνα 4.10 : Χάραξη δύο γεωτρήσεων με KOP στα 4000ft (0) και 7000ft (1).....	78
Εικόνα 4.11 : Σχεδιασμός οριζόντιας προβολής τροχιάς	80
Εικόνα 4.12 : Φόρμα υπολογισμών με τη μέθοδο ελάχιστης καμπυλότητας.....	82
Εικόνα 4.13 : Πίνακας αποτελεσμάτων και οριζόντια προβολή πραγματικής γεώτρησης στη βάση των μετρήσεων από σταθμό σε σταθμό.	82
Εικόνα 4.14 : : Εισαγωγή δεδομένων μετρήσεων σε φύλλοExcel	83
Εικόνα 4.15 : Υπολογισμός οριζόντιας προβολής τροχιάς (Bourgoyne Jr., και συν., 1991)	86
Εικόνα 4.16 : Εναλλακτικές διαδρομές προσέγγισης του στόχου.....	88
Εικόνα 4.17 : Αρχείο «txt» που περιέχει τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την οριζόντια προβολή της τροχιάς (περίπτωση καμπύλης 5 Εικόνα 4.16)	89
Εικόνα 4.18 : Επίδραση ρυθμού αλλαγής αζιμούθιου επί της τροχιάς της γεώτρησης	92

Εικόνα 4.19 Τροχιές με μεταβαλλόμενους ρυθμούς γωνίας κλίσης και αξιμούθιου 93

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 : Κατηγορίες οριζόντιων γεωτρήσεων 18

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα εφαρμογής 4.2.2 73

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα εφαρμογής 4.2.2 74

Πίνακας 4.3 Επιλογή δεδομένων και εμφάνιση αποτελεσμάτων για την περίπτωση 1 91

Πίνακας 4.4 Επιλογή δεδομένων και εμφάνιση αποτελεσμάτων για την περίπτωση 4.5.4 93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Οριζόντιες και κεκλιμένες γεωτρήσεις

Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Πετρελαίων της Αμερικής (American Petroleum Institute-API) ως κατευθυνόμενη διάτρηση ορίζεται: η τέχνη και η επιστήμη της στοχευμένης (προγραμματισμένης) παρέκκλισης της τροχιάς μιας γεώτρησης προς συγκεκριμένη κατεύθυνση με σκοπό την προσέγγιση ενός προκαθορισμένου στόχου που βρίσκεται στο υπέδαφος.

1.1. Ιστορικά στοιχεία

Η αρχική θεώρηση πως κάθε γεώτρηση είναι και παραμένει κατά την όρυξή της σε κατακόρυφη διεύθυνση ή με άλλα λόγια πως ο πυθμένας κάθε γεώτρησης βρίσκεται ακριβώς κάτω από τη θέση του γεωτρύπανου δεν ισχύει στην πράξη. Η πετρελαϊκή βιομηχανία άρχισε συνειδητοποιεί τα προβλήματα των φυσικά παρεκκλινόμενων γεωτρήσεων μετά την έναρξη λειτουργίας του πεδίου Seminole στην Οκλαχόμα το 1926. Η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων στο συγκεκριμένο πεδίο ήταν πολύ μικρή και σε συνδυασμό με την τάση για παρέκκλιση, είχε ως αποτέλεσμα η πορεία ορισμένων γεωτρήσεων να τέμνει την τροχιά γεωτρήσεων που ήδη βρισκόταν σε παραγωγή. Επιπλέον, το ολικό μήκος κάθε γεώτρησης για την προσέγγιση του στόχου διέφερε από πηγάδι σε πηγάδι παρόλο που η κατακόρυφη απόσταση του σχηματισμού στόχου από την επιφάνεια ήταν σχεδόν σταθερή.

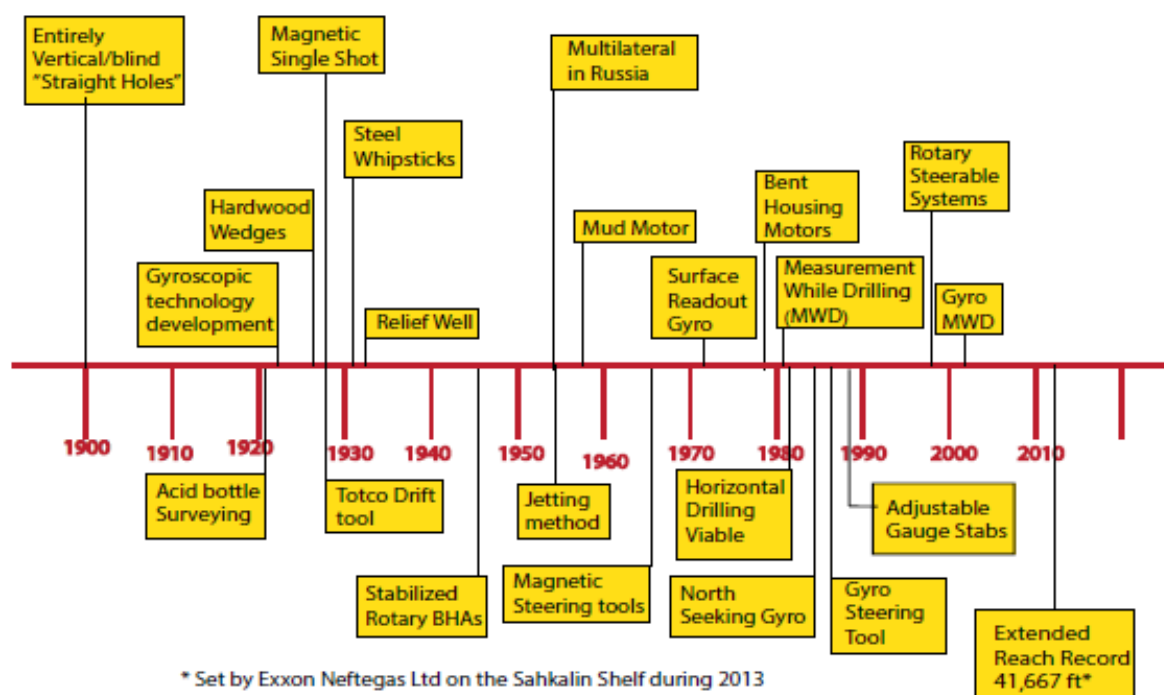
Κατά τα τέλη της δεκαετίας 1920 αναπτύχθηκαν συστήματα τα οποία έδιναν την δυνατότητα μέτρησης κλίσης και αζιμούθιου ταυτοχρόνως. Η μέση γωνία παρέκκλισης από την κατακόρυφη τροχιά ήταν περίπου 13° ενώ μετρήθηκαν γωνίες μέχρι και 46° .

Η πρώτη κατευθυνόμενη κεκλιμένη γεώτρηση διανοίχθηκε στην Καλιφόρνια το 1930 για την εκμετάλλευση παράκτιου κοιτάσματος πετρελαίου. Επειδή υπήρχε θέμα σχετικά με την οριοθέτηση των ιδιοκτησιών της περιοχής εκμετάλλευσης οι διαχειριστές του έργου έκαναν χρήση των κατευθυνόμενων γεωτρήσεων έτσι ώστε να αντλούν πετρέλαιο το οποίο αντιστοιχούσε σε μέρος του ταμειυτήρα εκτός των ορίων της δικιάς τους ιδιοκτησίας. Την δεκαετία του 1930 οι κατευθυνόμενες γεωτρήσεις χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει εκμετάλλευση κοιτασμάτων πετρελαίου τα οποία δε θα μπορούσαν να προσεγγιστούν με άλλο τρόπο. Για παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε η κατευθυνόμενη διάτρηση για την

άντληση πετρελαίου βρισκόμενου κάτω από κοιμητήριο ή σε άλλη περίπτωση για την προσέγγιση υποθαλάσσιου κοιτάσματος με έδραση του γεωτρύπανου να βρίσκεται στην στεριά.

Ήσσανος σημασίας θεωρείτο η διάνοιξη κατευθυνόμενων γεωτρήσεων μέχρι που έγινε όρυξη κεκλιμένης βοηθητικής γεώτρησης για την αχρήστευση μίας γεώτρησης βρισκόμενης υπό ανάφλεξη στο Conroe του Texas. Στην περίπτωση αυτή κατά τη διάρκεια της διάτρησης προκλήθηκε ανατίναξη με αποτέλεσμα τη δημιουργία κρατήρα διαμέτρου 170 ft περιμετρικά του πηγαδιού ενώ το γεωτρύπανο χάθηκε ολοκληρωτικά. Περίπου 6.000 βαρέλια πετρελαίου ανέβλυζαν καθημερινώς από τον κρατήρα. Η βοηθητική γεώτρηση έγινε κοντά στην προβληματική. Τεχνικές κατευθυνόμενης διάτρησης χρησιμοποιήθηκαν για να προσεγγιστούν οι σχηματισμοί πλησίον του σημείου ανάφλεξης, η οποία σταμάτησε μέσω της εισπίεσης υγρών από τη βοηθητική γεώτρηση στην προβληματική. Από τότε η κατευθυνόμενη διάτρηση έγινε ευρέως αποδεκτή. Σήμερα, η διαρκής έρευνα και ανάπτυξη νέων εργαλείων και τεχνικών καθιστά την κατευθυνόμενη διάτρηση αρκετά πιο οικονομική και αποτελεσματική (ακριβής).

Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της τεχνολογίας όρυξης γεωτρήσεων με τις κομβικές χρονικές περιόδους που χαρακτηρίζουν τα τεχνολογικά άλματα στον τομέα αυτόν.



Εικόνα 1.1 : Η εξέλιξη της κατευθυνόμενης διάτρησης

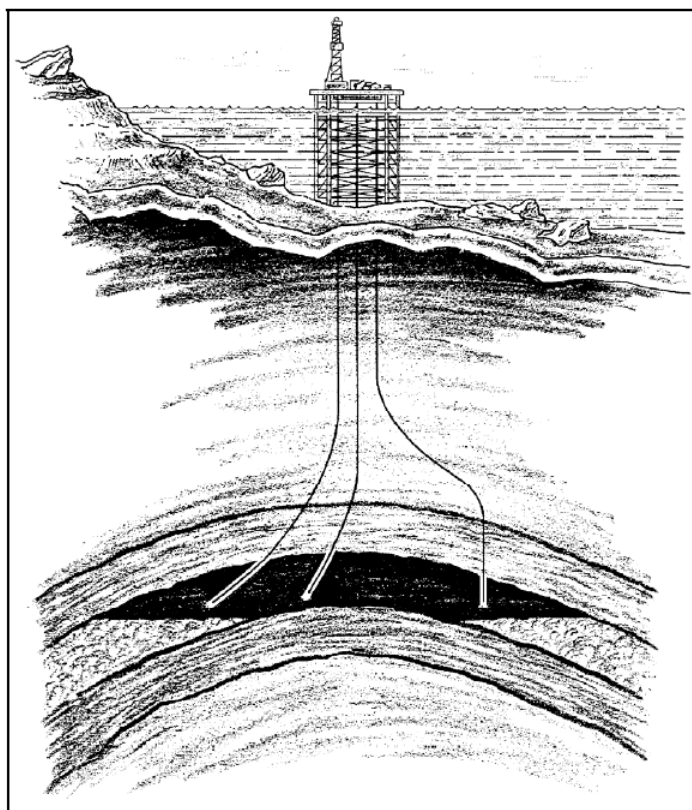
1.2. Εφαρμογές κεκλιμένων – οριζόντιων γεωτρήσεων

Οι βασικές περιπτώσεις εφαρμογής των κεκλιμένων-οριζόντιων γεωτρήσεων εξετάζονται στη συνέχεια.

1.2.1. Ανάπτυξη υποθαλάσσιων κοιτασμάτων.

Αποτελεί ίσως την πλέον συνηθισμένη περίπτωση όρυξης κεκλιμένων γεωτρήσεων. Από ένα σημείο, που μπορεί να ανήκει σε μία πλωτή εξέδρα, ξεκινά ένας μεγάλος αριθμός κεκλιμένων γεωτρήσεων με σκοπό την πλήρη κάλυψη του υποθαλασσίου κοιτάσματος (Εικόνα 1.2). Αναφέρονται περιπτώσεις εξεδρών στην Β. Θάλασσα από τις οποίες έχουν ορυχθεί έως και 60 γεωτρήσεις.

Με την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, γνωστής διεθνώς με τον όρο «ανάπτυξη κοιτασμάτων με πολλαπλές γεωτρήσεις» (*multiwell development*), μειώνεται δραστικά το υψηλό κόστος διάτρησης μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων που απαιτείται για την ανάπτυξη ενός σημαντικού αριθμού υποθαλάσσιων κοιτασμάτων -μεγάλων κατά κανόνα διαστάσεων- τα οποία σε περίπτωση εφαρμογής της συμβατικής τεχνικής θα χαρακτηρίζονταν ως «οικονομικά μη εκμεταλλεύσιμα».

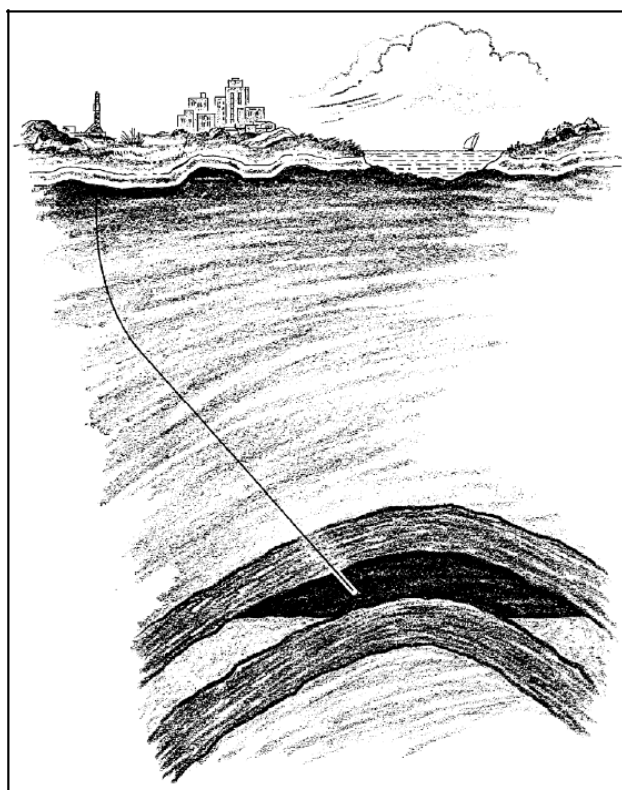


Εικόνα 1.2 : Διάτρηση πολλαπλών γεωτρήσεων από πλατφόρμα (Carden, et al., 2007)

1.2.2. Κοιτάσματα σε δυσπρόσιτες περιοχές ή περιοχές όπου υφίστανται ειδικοί περιορισμοί

Πολλές φορές η εγκατάσταση του γεωτρύπανου ακριβώς πάνω από τον προκαθορισμένο "σχηματισμό στόχο" είναι δυσχερής ή/και αδύνατη, ενώ η τοποθέτησή του σε κάποια λογική απόσταση αποτελεί μια πρόσφορη εναλλακτική λύση. Έτσι η όρυξη κεκλιμένων-οριζοντίων γεωτρήσεων αποτελεί τη μόνη λύση σε περιπτώσεις δομών που βρίσκονται κάτω από στρώματα πάγων στις αρκτικές περιοχές, κάτω από λίμνες, από όχθες ή εκβολές ποταμών, κάτω από ανώμαλο τοπογραφικό ανάγλυφο (λόφους, βουνά κ.λπ.), ή κάτω από πυκνοκατοικημένες περιοχές (Εικόνα 1.3).

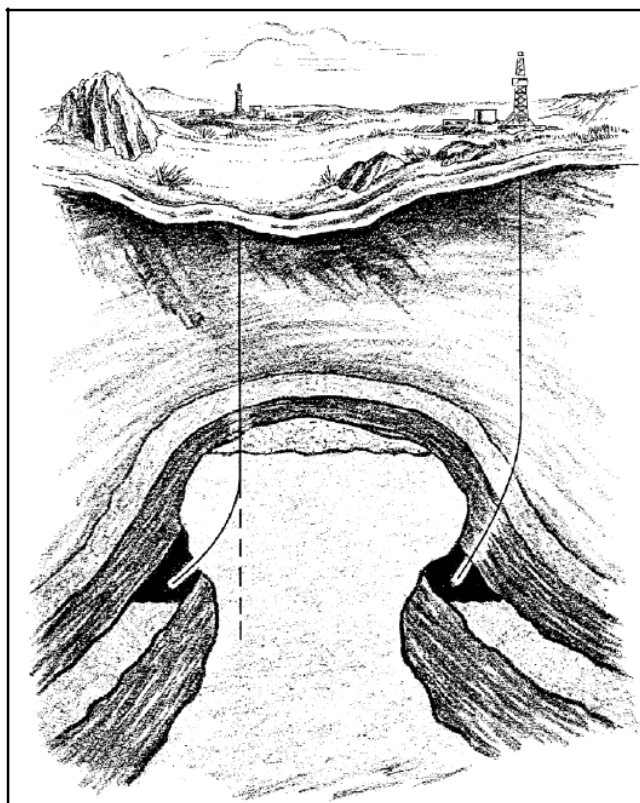
Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στις περιοχές όπου υφίστανται ειδικοί περιορισμοί ως προς τη διατηρητική δραστηριότητα (δρόμους διεθνών θαλασσιών μεταφορών, σιδηροδρομικές αρτηρίες, όρια αλλαγής ιδιοκτησιακών στοιχείων μεταξύ διαφόρων φορέων έρευνας ή εκμετάλλευσης), ή ακόμα σε περιοχές όπου υφίστανται ειδικοί περιορισμοί όσον αφορά στην εγκατάσταση και λειτουργία εξέδρων (όπως για παράδειγμα λόγω τουριστικής ανάπτυξης ή λόγω προστασίας του περιβάλλοντος).



Εικόνα 1.3 : Κοίτασμα σε δυσπρόσιτη περιοχή (Carden, et al., 2007)

1.2.3. Διάτρηση γύρω από δόμο άλατος.

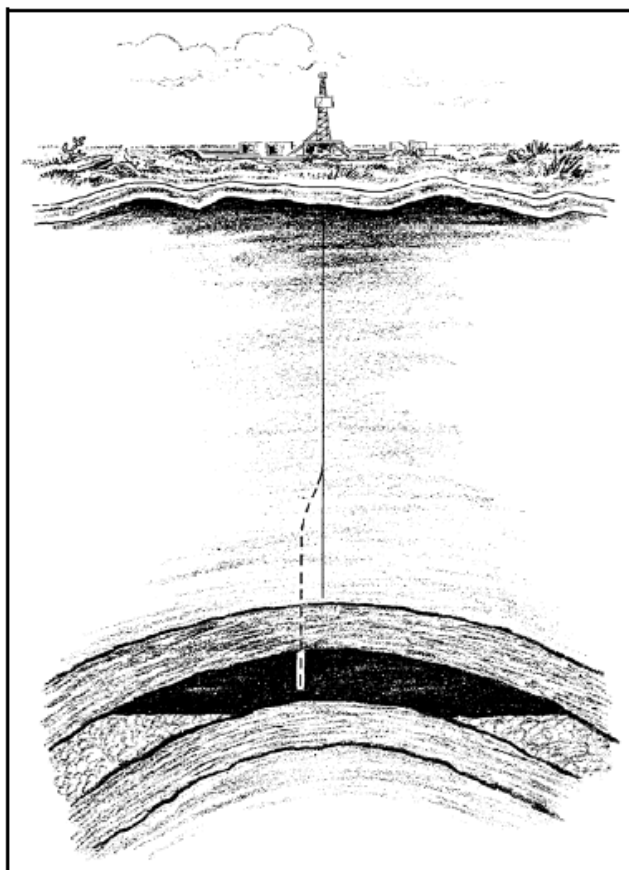
Στην περιοχή γύρω από έναν δόμο άλατος δημιουργούνται γεωλογικές δομές ενδιαφέροντος, καθώς υλικό διαπυρισμού διεισδύει και παραμορφώνει τα υπερκείμενα του δόμου ιζήματα. Κοιτάσματα πετρελαίου που εντοπίζονται στις πλευρές ή κάτω από δόμο άλατος, προσεγγίζονται επιτυχώς με κεκλιμένες γεωτρήσεις με σκοπό την παράκαμψη του δόμου, καθώς η διάτρηση μέσω αυτού ενέχει σοβαρά τεχνικά προβλήματα (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4 Διάτρηση γύρω από δόμο άλατος (Carden, et al., 2007)

1.2.4. Περιπτώσεις ατυχημάτων κατά τη διάτρηση.

Κατά την προχώρηση μιας γεώτρησης είναι πιθανόν να συμβούν ατυχήματα όπως, αποκοχλίωση, θραύση, μερική ή ολική ενσφήνωση της διατρητικής στήλης, ολίσθηση τμημάτων της σωλήνωσης καθώς και πτώσεις σιδηρών εργαλείων μέσα στο πηγάδι. Αν η εργασία αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών (αλίευση) αποτύχει, τμήματα του εξοπλισμού παραμένουν αναγκαστικά μέσα στη γεώτρηση, καθιστώντας αδύνατη τη συνέχιση της διάτρησης. Στις περιπτώσεις αυτές, η αντιμετώπιση είναι η αλλαγή της πορείας της γεώτρησης πάνω από το σημείο όπου έχει παρουσιαστεί το πρόβλημα, με διάτρηση υπό κλίση (γνωστή με τον όρο "πλευρική όρυξη"-sidetracking) (Εικόνα 1.5).

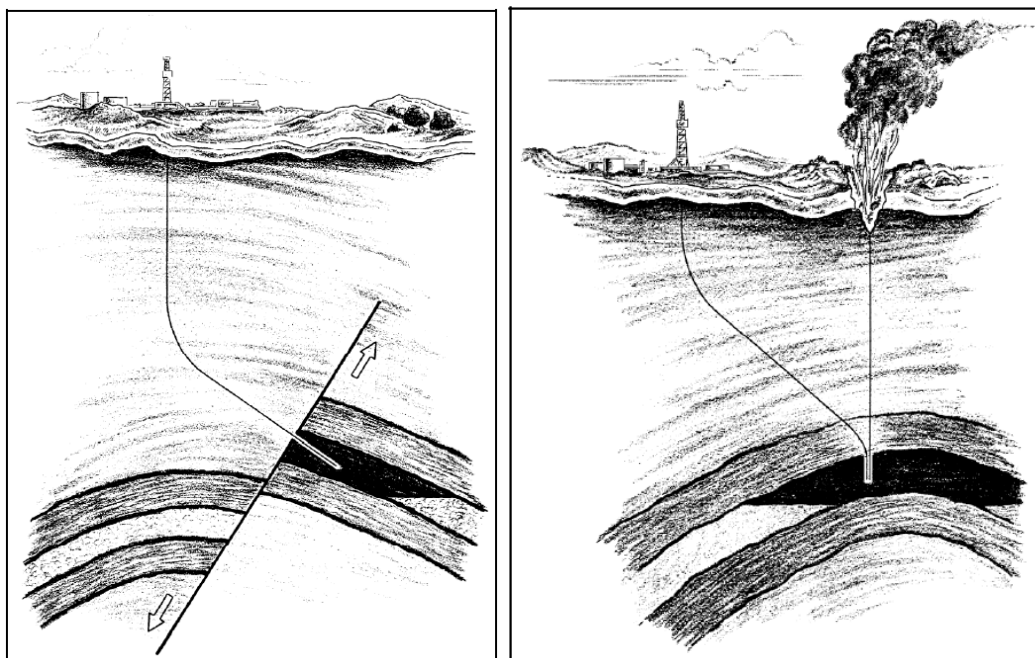


Εικόνα 1.5 : Πλευρική όρυξη για την παράκαμψη προβληματικού τμήματος της (Carden, et al., 2007)

1.2.5. Διάτρηση υπό εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η συνέχιση της διάτρησης καθίσταται δύσκολη ή και αδύνατη. Για παράδειγμα, γεώτρηση που συναντά στην πορεία της ρήγμα είναι ιδιαίτερα ασταθής. Για να αποφευχθούν οι κίνδυνοι αυτοί, ενδείκνυται η όρυξη κεκλιμένης γεώτρησης που παρεκκλίνει με στόχο είτε να αποφύγει, είτε να περάσει κάθετα μέσα από το ρήγμα (Εικόνα 1.6)

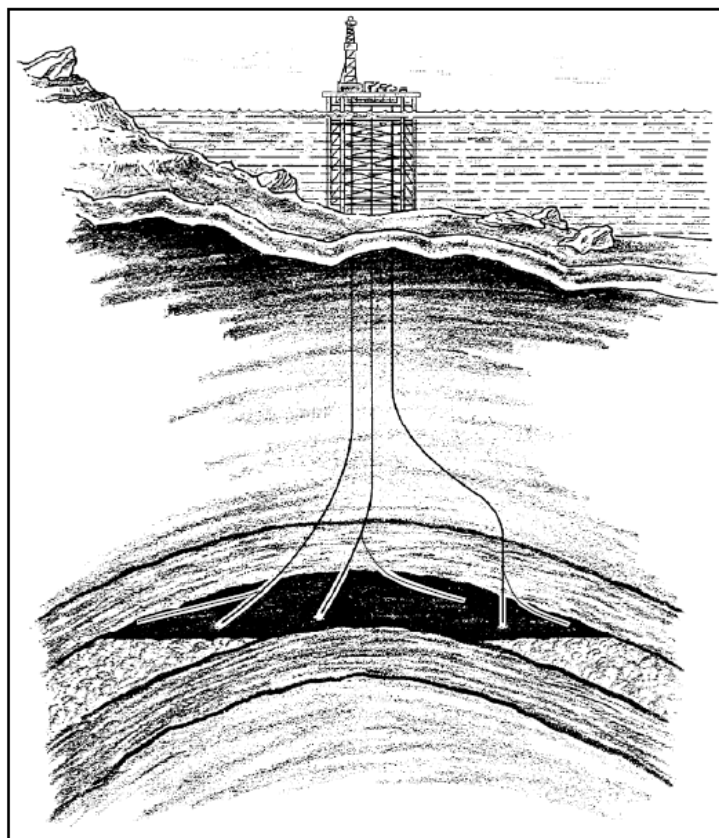
Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις όπου απαιτείται η αχρήστευση ("σκότωμα") μιας εξαιρετικά προβληματικής γεώτρησης (π.χ. ανάφλεξη, ανεξέλεγκτη εισροή ρευστών). Για τον σκοπό αυτό, από επιφανειακό σημείο σε κάποια απόσταση από την προβληματική γεώτρηση ορύσσεται άλλη κεκλιμένη βοηθητική γεώτρηση –γεώτρηση εκτόνωσης (relief well), που τέμνει την πρώτη σε προκαθορισμένο σημείο και χρησιμοποιείται για τη διοχέτευση υλικών πλήρωσης όπως, υψηλής πυκνότητας λάσπη ή γαλάκτωμα τσιμέντου (Εικόνα 1.7)



Εικόνα 1.6 Διάτρηση μέσω ρήγματος Εικόνα 1.7 Διάτρηση βοηθητικής γεώτρησης (Carden, et al., 2007)

1.2.6. Έρευνα περιοχών ευρείας έκτασης.

Κατά τη φάση της διεξαγωγής ερευνητικών γεωτρήσεων σε περιοχές μεγάλης έκτασης, συχνά κρίνεται πιο οικονομική η όρυξη πολλαπλών κεκλιμένων τμημάτων με αφετηρία μια κατακόρυφη γεώτρηση (Εικόνα 1.8) παρά η διάτρηση πολλών κατακόρυφων γεωτρήσεων. Αξίζει δε να αναφερθεί ότι σήμερα με τη ραγδαία εξέλιξη της οριζόντιας διάτρησης, η όρυξη μιας οριζόντιας γεώτρησης εντός του υπό έρευνα γεωλογικού υποβάθρου θεωρείται -παρά το υψηλότερο κόστος διάτρησης σε σχέση με τη συμβατική τεχνική- εξαιρετικά αποτελεσματική για τη συλλογή πληροφοριών όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του ευρύτερου γεωλογικού χώρου, αλλά και του σχηματισμού ή των σχηματισμών ενδιαφέροντος προς όλες τις διευθύνσεις ανάπτυξής του(ς) στο χώρο.



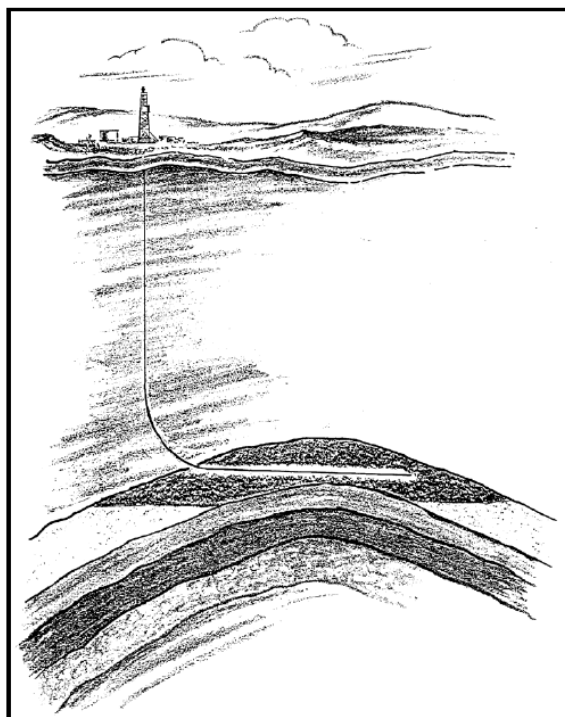
Εικόνα 1.8 Πολλαπλές κεκλιμένες γεωτρήσεις για την ανάπτυξη περιοχής μεγάλης έκτασης
(Carden, et al., 2007)

1.2.7. Ανάπτυξη "οριακών" ή "φτωχών" κοιτασμάτων με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας και του τελικού ποσοστού απόληψής τους.

Η επιλεκτική εφαρμογή της όρυξης κεκλιμένων γεωτρήσεων υπό κλίση μεγαλύτερη των 65° και οριζοντίων γεωτρήσεων μικρού, μέσου ή μεγάλου τόξου καμπυλότητας σε περιπτώσεις που παρουσιάζουν ευνοϊκά χαρακτηριστικά, έχει επανειλημμένα αποδειχθεί στην πράξη ότι έχει εξαιρετικά θετικές επιπτώσεις στο κόστος της παραγωγής. Αναφέρονται προγράμματα όρυξης ενός ή πολλών οριζοντίων (με κλίση μεγαλύτερη από 86°) καναλιών αποστράγγισης (drainholes) από τον πυθμένα ή από διαφορετικά καθ' ύψος σημεία μιας κατακόρυφης ή μιας κεκλιμένης γεώτρησης με σκοπό την ανάπτυξη:

- ❖ φυσικά ρωγματωμένων ζωνών με συστήματα ρωγμάτωσης κατακόρυφης ή ακανόνιστης διεύθυνσης,
- ❖ αβαθών συγκεντρώσεων πετρελαίου με εκτεταμένη οριζόντια ανάπτυξη, ή
- ❖ μικρού πάχους και μικρής διαπερατότητας κοιτασμάτων που έχουν ιδιαίτερα χαμηλή παραγωγικότητα.

Προγράμματα όρυξης οριζοντίων γεωτρήσεων (Εικόνα 1.9) έχουν με επιτυχία εφαρμοσθεί και σε συνδυασμό με μεθόδους τριτογενούς παραγωγής, σε περιπτώσεις ανάπτυξης κοιτασμάτων που υπέρκεινται υδροφόρου στρώματος ή υπόκεινται αερίου καλύμματος ή βρίσκονται μεταξύ αερίου καλύμματος και υδροφόρου στρώματος. Ο στόχος είναι η αποτελεσματική αντιμετώπιση της πρόωρης εμφάνισης αερίου ή νερού στον πυθμένα της γεώτρησης ή η εισπίεση υπέρθερμου ατμού ή θερμού νερού, με σκοπό την προώθηση μεγαλύτερου όγκου πετρελαίου προς τις παραγωγικές γεωτρήσεις.

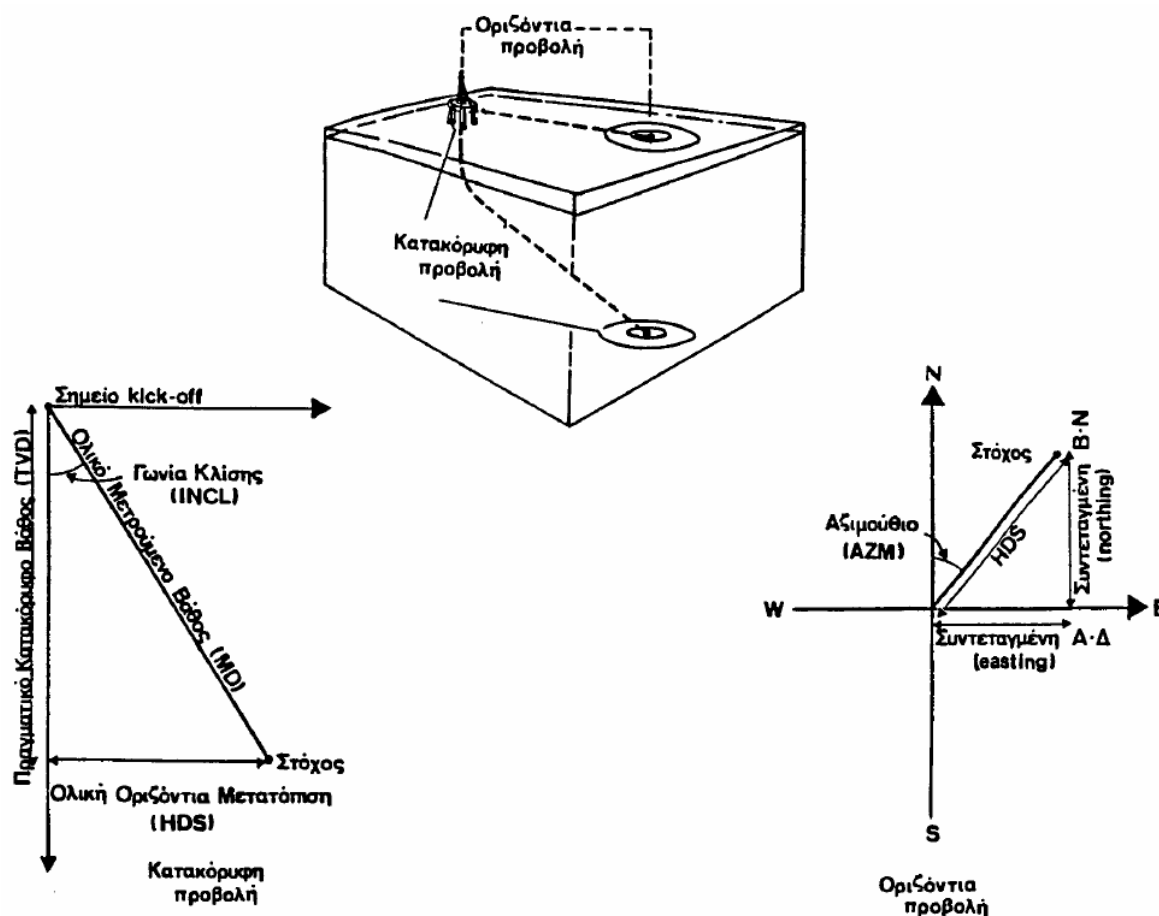


Εικόνα 1.9 Οριζόντια γεώτρηση (Carden, et al., 2007)

1.3. Βασική ορολογία – γεωμετρικοί παράμετροι τροχιάς

Γωνία Κλίσης (*Inclination Angle* ή *Drift Angle, I*)

Ορίζεται η γωνία μεταξύ της κατακόρυφης διεύθυνσης και της εφαπτομένης σε οποιοδήποτε σημείο της τροχιάς.



Εικόνα 1.10 : Αναπαράσταση τροχιάς κεκλιμένης γεώτρησης στον 3-διάστατο χώρο

Γωνία Διεύθυνσης ή Αζιμούθιο (Direction Angle ή Azimuth, A).

Ορίζεται η γωνία μετρούμενη στο οριζόντιο επίπεδο- μεταξύ της διεύθυνσης του πραγματικού Βορρά και της εφαπτομένης επί οποιουδήποτε σημείου της τροχιάς. Ορίζονται ωστόσο η διεύθυνση του μαγνητικού Βορρά (με βάση το γήινο μαγνητικό πεδίο) και η διεύθυνση του γεωγραφικού Βορρά (με βάση τη θέση του Βόρειου πόλου), δυο διευθύνσεις που στην γενική περίπτωση δεν ταυτίζονται. Επειδή στην πράξη ο μαγνητικός Βορράς μετράται με τη χρήση πυξίδας, απαιτείται διόρθωση της τιμής αυτής ώστε να βρεθεί η γωνία διεύθυνσης ως προς τον γεωγραφικό -πραγματικό- Βορρά. Η τιμή της γωνίας διόρθωσης είναι ίση με τη γωνία μεταξύ του μαγνητικού και του γεωγραφικού Βορρά, (γνωστή ως "μαγνητική απόκλιση", *magnetic declination ή declination angle*). Όταν ο μαγνητικός Βορράς μετράται ανατολικά του γεωγραφικού, η τιμή της μαγνητικής απόκλισης πρέπει να προστίθεται στη μετρούμενη με την πυξίδα τιμή, ώστε να προκύπτει η πραγματική τιμή της γωνίας διεύθυνσης ως προς το γεωγραφικό Βορρά. Στην αντίθετη

περίπτωση όπου υπάρχει μαγνητική απόκλιση προς τα δυτικά, η τιμή αυτή πρέπει να αφαιρείται από τη μετρούμενη τιμή της γωνίας διεύθυνσης.

Γωνιακές Συνθήκες (Angular Conditions)

Ορίζεται το ζεύγος των επιθυμητών ή επιτεύξιμων γωνιών κλίσης και διεύθυνσης σε κάθε σημείο κατά μήκος της τροχιάς και εκφράζει με αναλυτικό τρόπο τον υφιστάμενο προσανατολισμό της γεώτρησης στο ίδιο σημείο. Ειδικότερα ο όρος "**αρχικές γωνιακές συνθήκες**" χρησιμοποιείται για να εκφράσει τις γωνιακές συνθήκες στο αρχικό σημείο παρέκκλισης. Ο όρος "**τελικές γωνιακές συνθήκες**" αφορά στις γωνιακές συνθήκες με τις οποίες προσεγγίζεται το τελικό "σημείο στόχος" όπου θα καταλήξει η γεώτρηση, ενώ ο όρος "**ενδιάμεσες γωνιακές συνθήκες**" για τις γωνιακές συνθήκες κατά την προσέγγιση οποιοδήποτε άλλου ενδιάμεσου σημείου στην πορεία της γεώτρησης.

Πραγματικό Κατακόρυφο Βάθος (True Vertical Depth, TVD)

Ορίζεται η κατακόρυφη απόσταση κάθε σημείου της τροχιάς από την επιφάνεια.

Οριζόντια Μετατόπιση / Απόσταση (Horizontal Displacement ή Drift, HDS)

Ορίζεται η οριζόντια απόσταση κάθε σημείου της τροχιάς από την κατακόρυφο που διέρχεται από τη θέση έναρξης της γεώτρησης στην επιφάνεια.

Ολικό Μετρούμενο Βάθος (Measured Depth, MD)

Ορίζεται το ολικό διάστημα που ορύσσεται για την προσέγγιση του τελικού στόχου ή κάποιου ενδιάμεσου σημείου πάνω στην τροχιά της γεώτρησης.

Συντεταγμένες B-N και A-Δ ενός σημείου της τροχιάς (Coordinates N-S, E-W)

Ορίζονται οι αποστάσεις κάθε σημείου της τροχιάς (προβαλλομένου στο οριζόντιο επίπεδο), κατά τις διευθύνσεις B-N και A-Δ, από ένα καθορισμένο σημείο αναφοράς. Σαν τέτοιο επιλέγεται συνήθως η τομή των αξόνων B-N και A-Δ της μαγνητικής πυξίδας. Οι συντεταγμένες στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται και ως "*Northing*" (Συντεταγμένη B-N) και "*Easting*" (Συντεταγμένη A-Δ).

Σημείο "Kick-off" (kick-off point, KOP)

Ορίζεται το σημείο που βρίσκεται στο βάθος όπου αρχίζει η πρώτη παρέκκλιση της γεώτρησης από την κατακόρυφη διεύθυνση.

Για την επιλογή του σημείου παρέκκλισης, η σκληρότητα του σχηματισμού είναι πολύ σημαντική. Ένας σκληρός σχηματισμός μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην λειτουργία του οργάνου πρόσδωσης παρέκκλισης με αποτέλεσμα τόσο την καθυστέρηση έναρξης παρέκκλισης της γεώτρησης όσο και την ανάλωση πολλών κοπτικών άκρων. Ένας σχηματισμός πολύ μικρής σκληρότητας συνεπάγεται έντονη έκπλυση των τοιχωμάτων μίας γεώτρησης (*washouts*) ενώ σχηματισμός μέτριας σκληρότητας παρέχει τις βέλτιστες συνθήκες για την αποτελεσματική έναρξη παρέκκλισης. (Inglis, 1987)

Σταθμός (*Survey Station*)

Ονομάζεται κάθε σημείο της τροχιάς, όπου εκτελούνται μετρήσεις με σκοπό τον έλεγχο της πορείας της γεώτρησης.

Στόχος (*Target, Target point ή Objective*)

Χαρακτηρίζεται ο γεωλογικός σχηματισμός που αποτελεί τη ζώνη ενδιαφέροντος του εκάστοτε προγράμματος διάτρησης. Ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται ακόμα είτε αναφερόμαστε σε δεδομένο σημείο -σημειακός στόχος- που είναι το προκαθορισμένο σημείο όπου θα καταλήξει η γεώτρηση εντός του παραγωγικού σχηματισμού, είτε σε τμήμα του παραγωγικού σχηματισμού καθορισμένων διαστάσεων στον χώρο. Επιπρόσθετα ο όρος "**ενδιάμεσος στόχος**", χαρακτηρίζει οποιοδήποτε γεωλογικό σχηματισμό ή σημείο εντός του γεωλογικού υποβάθρου που η γεώτρηση οφείλει να προσεγγίσει ή να αποφύγει, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του εκάστοτε γεωτρητικού έργου.

Γωνία "Dog-leg"

Ορίζεται κάθε απότομη αλλαγή στην πορεία της γεώτρησης μεταξύ δύο σημείων-σταθμών, η οποία οφείλεται είτε σε αλλαγή της γωνίας κλίσης (αλλαγή πορείας στο κατακόρυφο επίπεδο), είτε σε αλλαγή της γωνίας διεύθυνσης (αλλαγή πορείας στο οριζόντιο επίπεδο), είτε σε ταυτόχρονη αλλαγή των δύο γωνιών (αλλαγή πορείας στον 3-διάστατο χώρο).

Ένταση του "Dog-leg" (*Dog-leg severity*)

Πρόκειται για τη γωνία "dog-leg", εκφρασμένη επί ενός καθορισμένου διαστήματος (συνήθως ανά 100 ft ή 30 m).

Ρυθμός Build-up (*Build-up rate*)

Ορίζεται ο ρυθμός αύξησης της Γωνίας Κλίσης, εκφρασμένος σε deg ανά δεδομένο διατρηθέν μήκος τμήματος (συνήθως ανά 100 ft ή 30 m).

Ρυθμός Drop-off (*Drop-off rate*)

Ορίζεται ο ρυθμός μείωσης της Γωνίας Κλίσης εκφρασμένος σε deg ανά δεδομένο διατρηθέν μήκος τμήματος (συνήθως ανά 100 ft ή 30 m).

Ρυθμός μεταβολής της Γωνίας Διεύθυνσης (*Turn rate*)

Ορίζεται ο λόγος της μεταβολής της γωνίας διεύθυνσης προς καθορισμένο μήκος διατρηθέντος τμήματος (συνήθως ανά 100 ft ή 30 m). Σε ορισμένες περιπτώσεις το μήκος αυτό δεν είναι το πραγματικό -δηλαδή το ολικό μετρούμενο μήκος τροχιάς- αλλά η προβολή αυτού του μήκους στο οριζόντιο επίπεδο. Πρόκειται δηλαδή για 100 ft ή 30 m μήκους μετρούμενου πάνω στην οριζόντια προβολή της τροχιάς.

Τμήμα "Build-up" (*Build-up section*)

Ορίζεται κάθε καμπυλόγραμμο τμήμα της τροχιάς κατά το οποίο η γωνία κλίσης συνεχώς αυξάνεται έως τη μέγιστη επιθυμητή τιμή.

Εφαπτομενικό τμήμα (*Tangent ή Straight ή Hold section*)

Ορίζεται το τμήμα που ακολουθεί διεύθυνση εφαπτομενική σε κάποιο σημείο του καμπυλόγραμμου τμήματος και κατά μήκος του οποίου οι γωνίες κλίσης και διεύθυνσης παραμένουν σταθερές και ίσες με τις αντίστοιχες παραμέτρους του κοινού σημείου επαφής μεταξύ των δύο τμημάτων.

Τμήμα "Drop-off" (*Drop-off section*)

Ορίζεται το τμήμα που συνήθως ακολουθεί το εφαπτομενικό τμήμα, κατά μήκος του οποίου η γωνία κλίσης σταδιακά ελαττώνεται έως ότου προσεγγιστεί η επιθυμητή τιμή, κατά την επαφή ή τη διέλευση της γεώτρησης διαμέσου του στόχου.

Βασικά σημεία τροχιάς (*Critical points*)

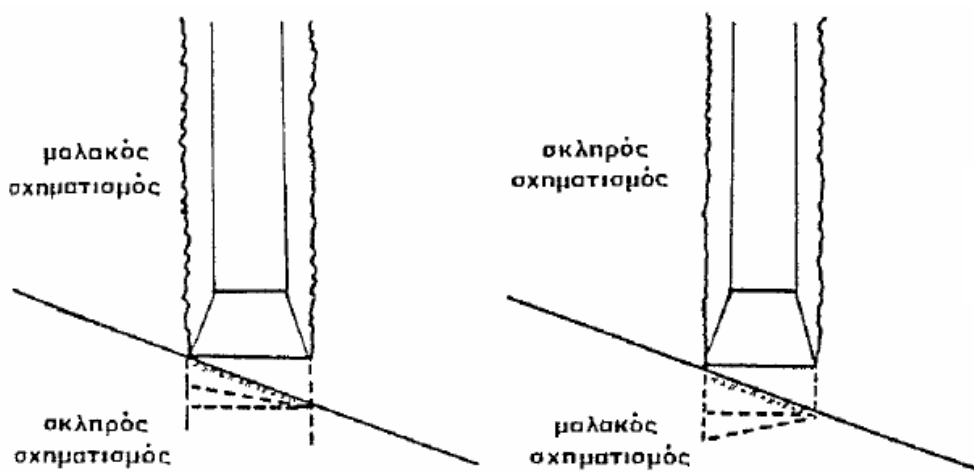
Ορίζεται κάθε σημείο πάνω στην τροχιά που αποτελεί αφετηρία ή κατάληξη ενός τμήματος δεδομένου τύπου, -όπως είναι το βασικό σημείο ebu (end-of build-up point), ή το βασικό σημείο sdo (start-of drop-off point), σημείο όπου τελειώνει το τμήμα αύξησης και σημείο όπου αρχίζει το τμήμα μείωσης της καμπυλότητας αντίστοιχα.

Γωνία προσανατολισμού (Tool-face orientation angle)

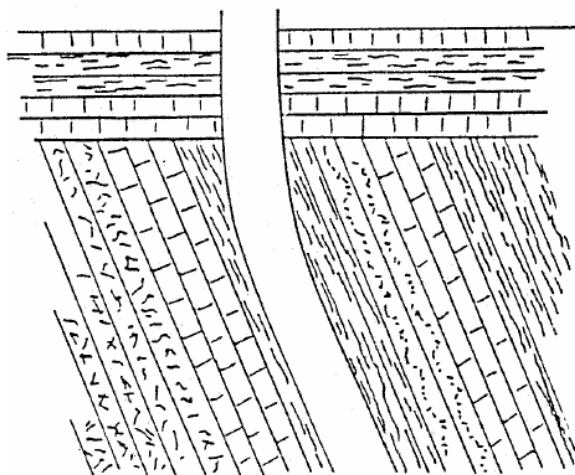
Πρόκειται για μέγεθος που προκύπτει από το συνδυασμό των επιτεύξιμων γωνιακών συνθηκών σε κάθε σημείο της γεώτρησης, εκφράζει τον προσανατολισμό της στην ίδια θέση και μετράται σε κλίμακα από 0ο-90ο ή από 90ο-0ο προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά του υφιστάμενου προσανατολισμού.

Γωνία οδήγησης του κοπτικού (Lead Angle)

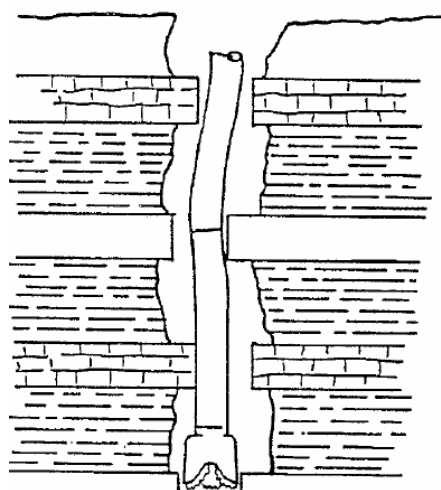
Η επίδραση παραγόντων στο κοπτικό άκρο, οι οποίοι σχετίζονται με τους διατρυόμενους σχηματισμούς, μπορεί να προκαλέσουν παρέκκλιση της πορείας της γεώτρησης έξω από την σχεδιασμένη (*bit walk*). Αντίστοιχα, αποτελούν και τις βασικές αιτίες για την πρόκληση της φυσικής παρέκκλισης κατακόρυφων γεωτρήσεων. Τέτοιοι παράγοντες αφορούν στην εναλλαγή μαλακών και σκληρών στρωμάτων (Εικόνα 1.13), την τάση του κοπτικού να διατρώει παράλληλα προς τις στρώσεις των στρωμάτων (Εικόνα 1.11) ή την παρουσία σκληρών φλεβών εντός μαλακών πετρωμάτων (Εικόνα 1.12) με αποτέλεσμα τη διάτρηση εκτός ορίων της γεώτρησης.



Εικόνα 1.11 Επίδραση σκληρότητας σχηματισμών επί του προσανατολισμού του κοπτικού

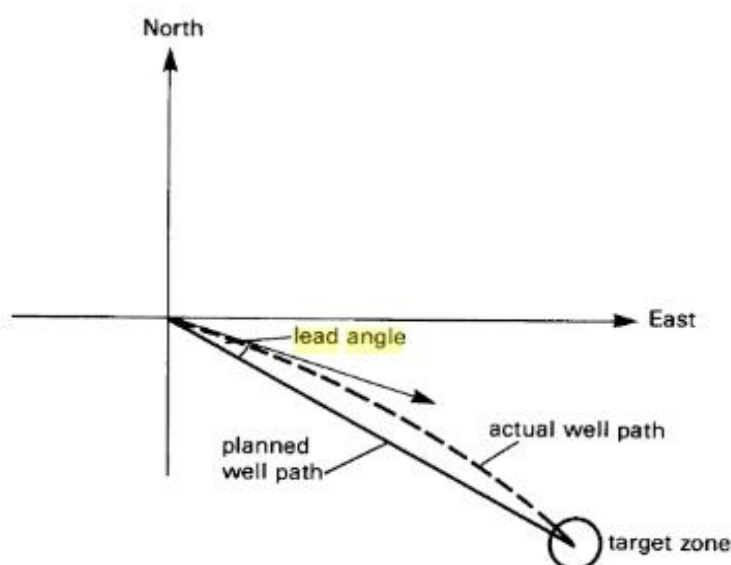


Εικόνα 1.12 Παρουσία σκληρών φλεβών εντός μαλακών πετρωμάτων



Εικόνα 1.13 Διάτρηση παράλληλων στρώσεων με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Η γωνία οδήγησης του κοπτικού αποτελεί τη γωνία προσανατολισμού που επιβάλλεται να ακολουθήσει το κοπτικό έτσι ώστε, με βάση τη θέση του στόχου, την τάση φυσικής παρέκκλισης του κοπτικού και το πρόγραμμα σχεδιασμού, να προσεγγίσει με επιτυχία το στόχο (Εικόνα 1.14). Η μαθηματική διαδικασία προσδιορισμού της γωνίας οδήγησης είναι πολύπλοκη με την έννοια ότι βασίζεται σε πολλά δεδομένα και η χρήση της είναι στην επιτόπου διάτρηση για τον έλεγχο της πορείας της τροχιάς.



Εικόνα 1.14 : Χρήση γωνίας οδήγησης του κοπτικού για την διόρθωση της τάσης για παρέκκλιση (*bit walk*)

1.4. Τύποι κατευθυνόμενων γεωτρήσεων

Υπάρχουν αρκετοί τύποι κατευθυνόμενων γεωτρήσεων, οι κυριότεροι από τους οποίους αναλύονται παρακάτω.

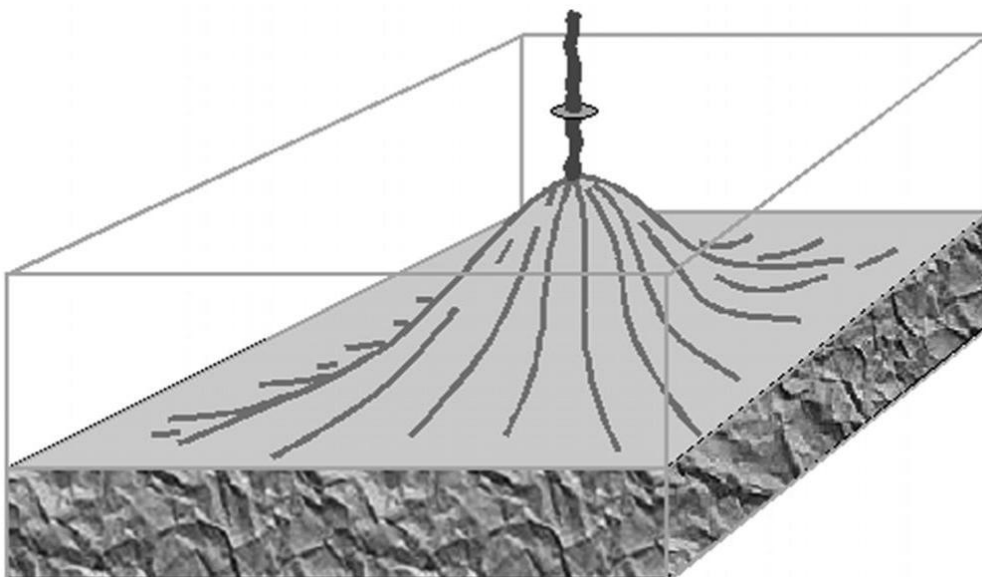
1.4.1. Οριζόντιες Γεωτρήσεις

Η οριζόντια διάτρηση συνίσταται στην όρυξη πηγαδιού διαμέσου ενός σχηματισμού με κλίση 90 μοίρες από τον κατακόρυφο άξονα. Τα οριζόντια τμήματα, που στην ουσία αποτελούν μεγάλου μήκους και υψηλής διαπερατότητας αγωγούς, συμβάλλουν στην αύξηση της επιφάνειας προσβολής του κοιτάσματος, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αντλητικής ικανότητας της γεώτρησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αυξημένης επιφάνειας επαφής μεταξύ γεώτρησης και παραγωγικού σχηματισμού, σε σύγκριση με εκείνη μίας κατακόρυφης ή κεκλιμένης γεώτρησης (Σταματάκη, 2003). Συνήθως εφαρμόζεται σε μικρού πάχους παραγωγικούς σχηματισμούς με καλή κατακόρυφη διαπερατότητα.

Επιπροσθέτως με τις οριζόντιες γεωτρήσεις περιορίζεται το πρόβλημα συγκέντρωσης αερίου και νερού στον πυθμένα της γεώτρησης σε μορφή κώνου εξαιτίας υψηλής πίεσης άντλησης. Ουσιαστικά, μάζα του ελεύθερου αερίου η του νερού που βρίσκεται στον ταμιευτήρα προσεγγίζει μέσω των πόρων τη ζώνη διάτρησης γύρω απ την γεώτρηση με αποτέλεσμα τη μειωμένη παραγωγή πετρελαίου. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που αφορά αυστηρά την περιοχή γύρω από τη γεώτρηση που βρίσκεται εντός της παραγωγικής ζώνης και συνδέεται με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής. Συμβαίνει όταν η πίεση με την οποία αντλούνται τα ρευστά από τον ταμιευτήρα προς την παραγωγική γεώτρηση ξεπεράσει την φυσική πίεση που απαιτείται για τον διαχωρισμό του πετρελαίου από το αέριο και το νερό.

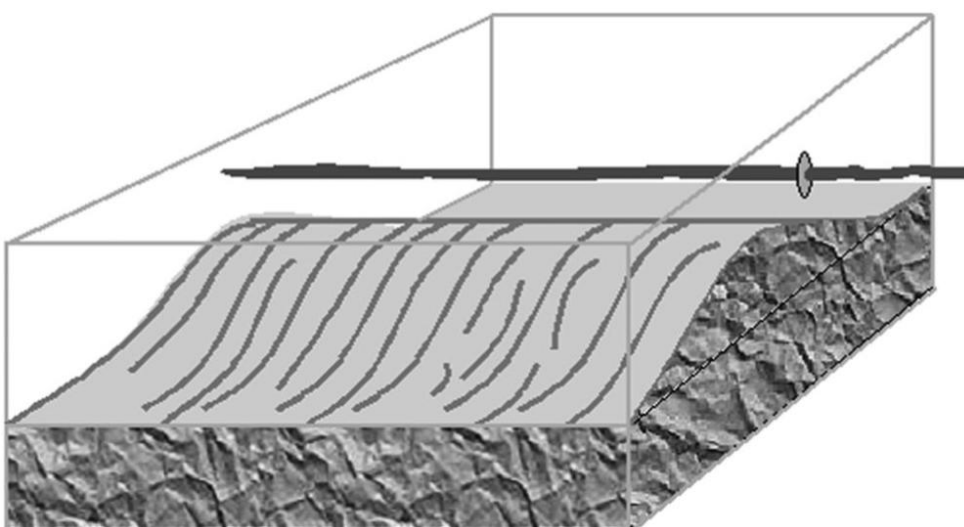
Σε κατακόρυφη γεώτρηση το σχήμα της επιφάνειας που διαμορφώνεται όταν μία γεώτρηση παράγει δευτερεύοντος σημασίας ρευστά θυμίζει συνήθως έναν κανονικό ή ανεστραμμένο κώνο όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.15.

Στην περίπτωση οριζόντιων γεωτρήσεων η αντίστοιχη επιφάνεια παίρνει την μορφή μεγάλου μήκους κορυφογραμμής (πρακτικά είναι πλευρά οριζόντιου κυλίνδρου) (Εικόνα 1.16).



Εικόνα 1.15 : Ο σχηματισμός επιφάνειας επαφής μορφής «κώνου» μεταξύ πετρελαίου και των άλλων ρευστών γύρω από κατακόρυφο πηγάδι.

Η ποσότητα των ανεπιθύμητων ρευστών (φυσικό αέριο και νερό) που αντλούνται μέσω μίας οριζόντιας γεώτρησης είναι συνήθως μικρότερη από αυτή ενός κατακόρυφου πηγαδιού στις αντίστοιχες συνθήκες. Αυτό αποτελεί και έναν από τους βασικούς λόγους που προτιμάται η διάτρηση των οριζοντίων γεωτρήσεων, για παράδειγμα, σε μικρού πάχους ταμιευτήρες που βρίσκονται υπεράνω στρώματος νερού (http://petrowiki.org/Water_and_gas_coning).



Εικόνα 1.16 : Ο σχηματισμός επιφάνειας επαφής μορφής «κώνου» μεταξύ πετρελαίου και των άλλων ρευστών γύρω από οριζόντιο πηγάδι.

Ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης μίας οριζόντιας γεώτρησης μπορεί να ποικίλει αναλόγως του σκοπού τον οποίο εξυπηρετεί η γεώτρηση. Ως εκ τούτου, τα οριζόντια πηγάδια κατηγοριοποιούνται με βάση την ακτίνα με την οποία διαγράφεται το καμπυλόγραμμο τμήμα (*build up*), σε υπερβολικά μικρής ή μικρής, μέσης και μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας. Οι κατηγορίες αυτές συνοψίζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 : Κατηγορίες οριζόντιων γεωτρήσεων

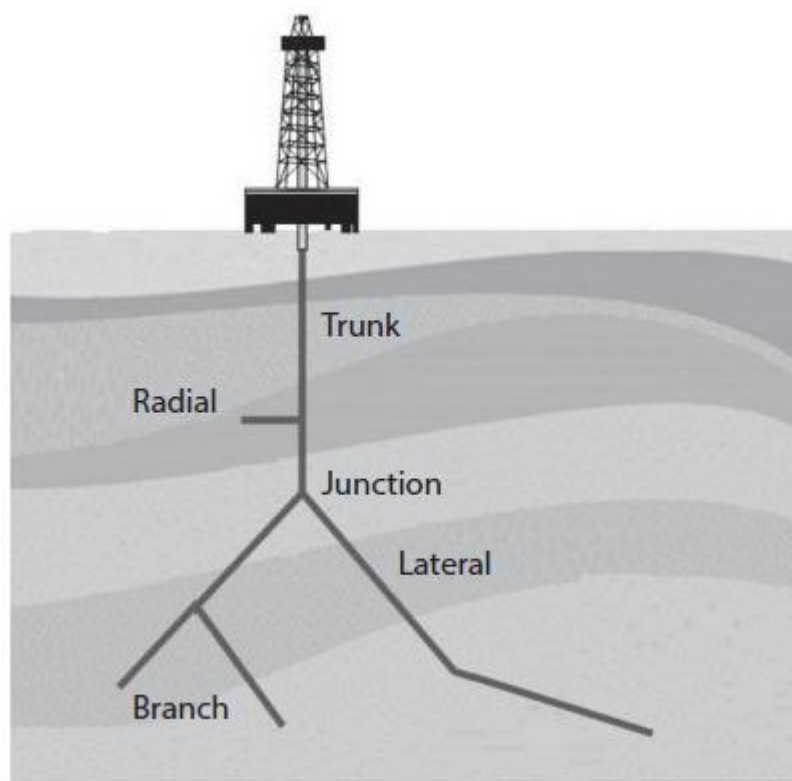
Τύπος Ακτίνας	Build up rate (°/100ft)	Μήκος ακτίνας (ft)
Υπερβολικά μικρής ακτίνας	60 – 200	100 – 200
Μικρής ακτίνας	60 – 150	250 - 350
Μέσης ακτίνας	8 – 30	500 – 1000
Μεγάλης ακτίνας	2 – 6	1000 - 3000

* *Build up rate (°/100ft)* : ρυθμός αύξησης της κλίσης του καμπυλόγραμμου τμήματος

Οι γεωτρήσεις που χαρακτηρίζονται από μεγάλες κλίσεις όπως και οι οριζόντιες συνήθως αντιμετωπίζουν και τα σημαντικότερα προβλήματα. Αυτά τα προβλήματα γίνονται εντονότερα με την αύξηση του βάθους, των γωνιών κλίσης και του αυξανόμενου μήκους των οριζοντίων τμημάτων. Για παράδειγμα, όσον αφορά τις οριζόντιες γεωτρήσεις, τόσο ο εξοπλισμός όσο και η σωλήνωση ευρίσκονται υπό υψηλό τασικό πεδίο. Επιπροσθέτως, το καθάρισμα του πηγαδιού γίνεται πιο δύσκολο, η «αλίευση» τμημάτων της διατρητικής στήλης γίνεται πιο δύσκολη και συνήθως αποτυγχάνει με αποτέλεσμα να αυξάνει ο κίνδυνος κατά την όρυξη τέτοιων πηγαδιών (Hossain, και συν., 2015).

1.4.2. Διακλαδιζόμενες – πολλαπλές (*Multilateral*) γεωτρήσεις

Η τεχνολογία διάτρησης διακλαδιζόμενων γεωτρήσεων αποτελεί μία μη συμβατική μέθοδο για την επαύξηση της απόδοσης ενός πηγαδιού. Περιλαμβάνει την όρυξη τμήματος κύριας γεώτρησης, το οποίο μπορεί να είναι κατακόρυφο ή κεκλιμένο. Από αυτό μπορεί να παρεκκλίνει μία σειρά από κεκλιμένες γεωτρήσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.17.



Εικόνα 1.17 : Μία διακλαδιζόμενη γεώτρηση

Η διάτρηση ενός διακλαδιζόμενου πηγαδιού πλεονεκτεί σε σχέση με την διάτρηση πολλών διακριτών πηγαδιών καθώς η όρυξη της κυρίως γεώτρησης θα πραγματοποιηθεί μία φορά μειώνοντας έτσι το κόστος. Επίσης, ο γεωτρητικός εξοπλισμός που απαιτείται μειώνεται αισθητά όπως και χώρος που καταλαμβάνει το γεωτρήσιμο με αποτέλεσμα να μειώνεται τόσο το κόστος όσο και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Στις διακλαδιζόμενες γεωτρήσεις αποτελεί τροχοπέδη η απαίτηση για διάτρηση με υψηλούς ρυθμούς αύξησης της κλίσης. Ως επακόλουθο, η καθέλκυση, εγκατάσταση και η ανέλκυση διαφόρων απαραίτητων τμημάτων του εξοπλισμού εγκυμονεί υψηλό ρίσκο. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η δυσκολία ελέγχου εισροής υλικού (άμμου) εντός των παρεκκλινόμενων γεωτρήσεων όταν αυτές δεν σωληνώνονται. Όσον αφορά το σχεδιασμό συναντώνται δυσκολίες λόγω της πολυπλοκότητας των διακλαδιζόμενων τμημάτων (Hossain, et al., 2015).

1.4.3. Κεκλιμένες γεωτρήσεις εκτεταμένης οριζόντιας μετατόπισης Extended Reach Drilling (ERD)

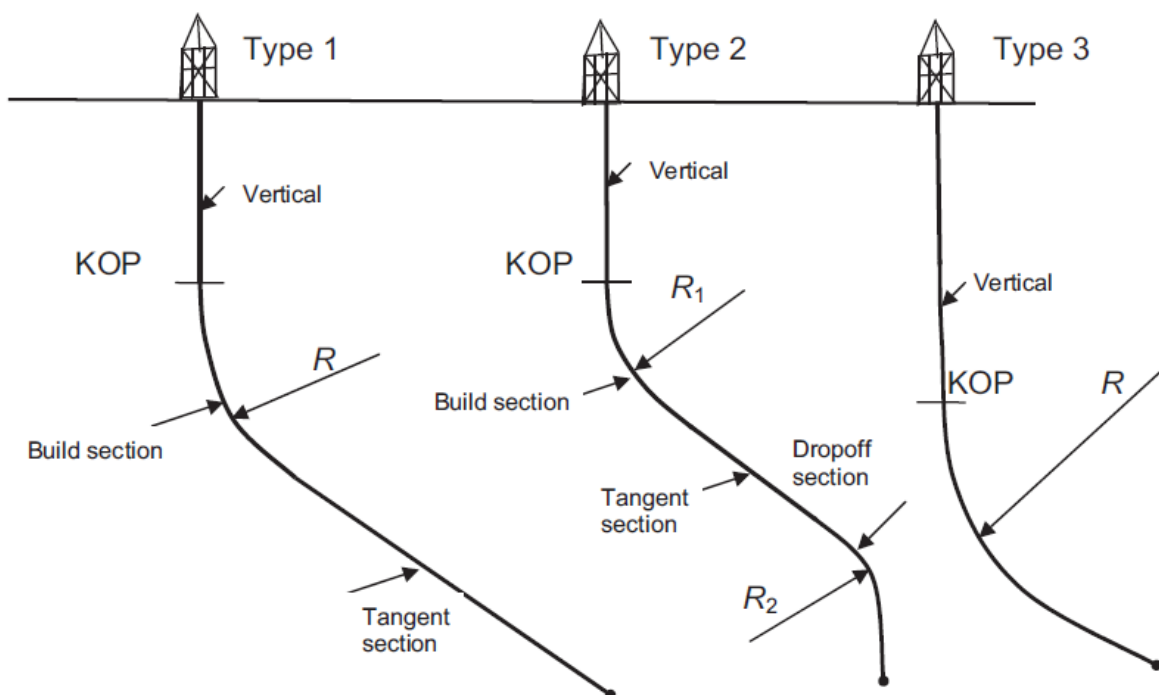
Σύμφωνα με τον διεθνώς αποδεκτό ορισμό, μια κεκλιμένη γεώτρηση χαρακτηρίζεται ως εκτεταμένης μετατόπισης μόνο αν το "ολικό μετρούμενο βάθος" της είναι ίσο ή μεγαλύτερο τουλάχιστον κατά δύο φορές από το "πραγματικό κατακόρυφο βάθος" της.

Όπως και ο όρος υπονοεί, αποτελεί τεχνική που εφαρμόζεται για να προσδώσει γρήγορα η γεώτρηση μεγάλη κλίση (μεγαλύτερη από 60° -65°) και που επιτρέπει την επίτευξη μεγάλης "οριζόντιας μετατόπισης" για την προσέγγιση απομακρυσμένων "σχηματισμών στόχων". Η "οριζόντια μετατόπιση" μιας κεκλιμένης γεώτρησης -κατά την οποία επιτυγχάνεται και η μέγιστη επιθυμητή γωνία κλίσης- αποτελεί την ενεργή ακτίνα δράσης του γεωτρήπανου (Stamataki, et al., 2003).

Με την βοήθεια των γεωτρήσεων εκτεταμένης οριζόντιας μετατόπισης μπορούν να προσεγγιστούν κοιτάσματα που βρίσκονται σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές στις οποίες δεν είναι επιτρεπτό να στηθεί εξέδρα γεωτρήπανου. Με την συγκεκριμένη μέθοδο το γεωτρήπανο μπορεί να εγκατασταθεί δεκάδες χιλιόμετρα από την εν λόγω περιοχή. Ως εκ τούτου πρέπει πάντα να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του κατάλληλου κοπτικού καθώς πρέπει να αποφεύγεται η συχνή ανέλκυση της διατρητικής στήλης, μία τέτοια διαδικασία μπορεί να διαρκέσει και 24 ώρες (Hossain, et al., 2015).

1.5. Βασικοί τύποι τροχιάς

Αν και κατά το στάδιο του αρχικού σχεδιασμού διερευνούνται και αξιολογούνται όλες οι πιθανά αποδεκτές μορφές της τροχιάς (η γενική μορφή περιλαμβάνει συνήθως κάποιο συνδυασμό μεταξύ καμπυλόγραμμων και εφαπτομενικών τμημάτων ανάλογα και με τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περίπτωση), τρεις κυρίως είναι οι βασικοί τύποι τροχιάς που εφαρμόζονται στην πράξη (Εικόνα 1.18).



Εικόνα 1.18 : Βασικοί τύποι τροχιάς (Mitchell, και συν., 2011)

1.5.1. Τύπος I Τροχιά ευθείας παρέκκλισης (*slant type ή build-and-sail type ή build-and-hold type*)

Μετά την αρχική παρέκκλιση στο σημείο kick-off -το οποίο συνήθως τοποθετείται σε μικρό βάθος-, ακολουθεί τμήμα αύξησης της γωνίας κλίσης (build-up τμήμα) έως ότου επιτευχθεί η μέγιστη επιθυμητή τιμή. Η τιμή αυτή διατηρείται σταθερή κατά το ακόλουθο εφαπτομενικό τμήμα, ώσπου να προσεγγιστεί ο στόχος της γεώτρησης (Εικόνα 1.18). Η βασική γεωμετρική μορφή της τροχιάς αποτελείται κατά σειρά ξεκινώντας από την επιφάνεια, από τα παρακάτω τμήματα:

- ❖ κατακόρυφο τμήμα,
- ❖ τμήμα αύξησης της καμπυλότητας,
- ❖ εφαπτομενικό τμήμα.

1.5.2. Τύπος II Τροχιά τύπου S (*S-type ή build-sail and drop type ή build-hold and drop type*)

Η γεώτρηση συνήθως παρεκκλίνει από την κατακόρυφη διεύθυνση σε μικρό βάθος και ακολουθεί τμήμα αύξησης της γωνίας κλίσης (build-up τμήμα) ως την επιθυμητή μέγιστη τιμή. Η τιμή αυτή διατηρείται σταθερή κατά το επόμενο εφαπτομενικό τμήμα και στη συνέχεια μειώνεται βαθμιαία (τμήμα drop-off) ώστε η τροχιά να επιστρέψει στην

κατακόρυφη διεύθυνση (Εικόνα 1.18). Η βασική γεωμετρική μορφή της τροχιάς αποτελείται κατά σειρά ξεκινώντας από την επιφάνεια, από τα παρακάτω τμήματα:

- ❖ κατακόρυφο τμήμα,
- ❖ τμήμα αύξησης της καμπυλότητας,
- ❖ ενδιάμεσο εφαπτομενικό τμήμα,
- ❖ τμήμα μείωσης της καμπυλότητας,
- ❖ τελικό εφαπτομενικό τμήμα.

1.5.3. Τύπος III Τροχιά τύπου J ή τύπου L (*J-type* ή *L-type*)

Μοιάζει με τον τύπο τροχιάς ευθείας παρέκκλισης, μόνο που η παρέκκλιση της γεώτρησης πραγματοποιείται συνήθως σε πολύ μεγαλύτερο βάθος. Μετά το καμπυλόγραμμο τμήμα αύξησης της γωνίας κλίσης, ακολουθεί το ευθύγραμμο ή εφαπτομενικό τμήμα υπό οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια διεύθυνση και με μεταβλητό -ανάλογα με την περίπτωση- μήκος έως το στόχο (Εικόνα 1.18). Η βασική γεωμετρική μορφή της τροχιάς αποτελείται κατά σειρά ξεκινώντας από την επιφάνεια, από τα παρακάτω τμήματα:

- ❖ κατακόρυφο τμήμα,
- ❖ τμήμα αύξησης της καμπυλότητας,
- ❖ εφαπτομενικό τμήμα

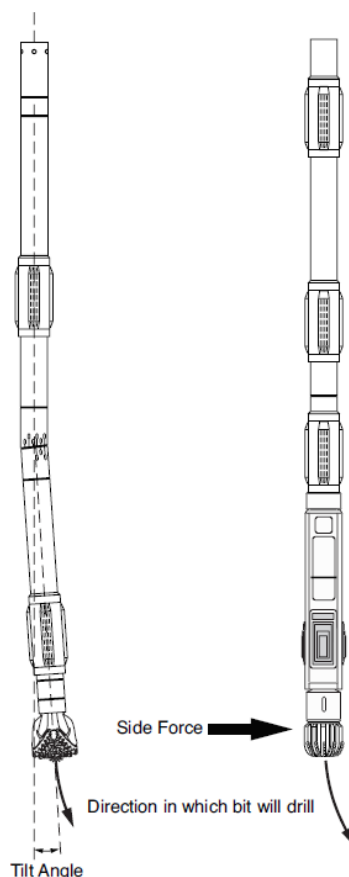
Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διατριβής εξετάζεται η περίπτωση τροχιάς που αποτελείται από τρία τμήματα (κατακόρυφο, αύξησης καμπυλότητας και εφαπτομενικό). Το πρόγραμμα επομένως δίνει την δυνατότητα σχεδιασμού τροχιάς τύπου Build and Hold όπως και τύπου L.

1.6. Όργανα πρόσδωσης παρέκκλισης

Υπάρχουν αρκετά εργαλεία και τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να αλλάξουν την κατεύθυνση του κοπτικού και κατ' επέκταση το αζιμούθιο ή/και την γωνία κλίσης της γεώτρησης. Αυτά τα εργαλεία και οι τεχνικές επιτυγχάνουν έναν εκ των δύο στόχων:

- ❖ Την πρόσδωση γωνίας κλίσης (tilt angle) επί του κοπτικού
- ❖ Την εφαρμογή πλευρικής τάσης (side force) επί του κοπτικού (Εικόνα 1.19)

Ως αποτέλεσμα η γεώτρηση μπορεί σταδιακά να αποκλίνει από την κατακόρυφη πορεία της.



Εικόνα 1.19 : Εφαρμογή γωνίας κλίσης ή πλευρικής τάσης επί του κοπτικού

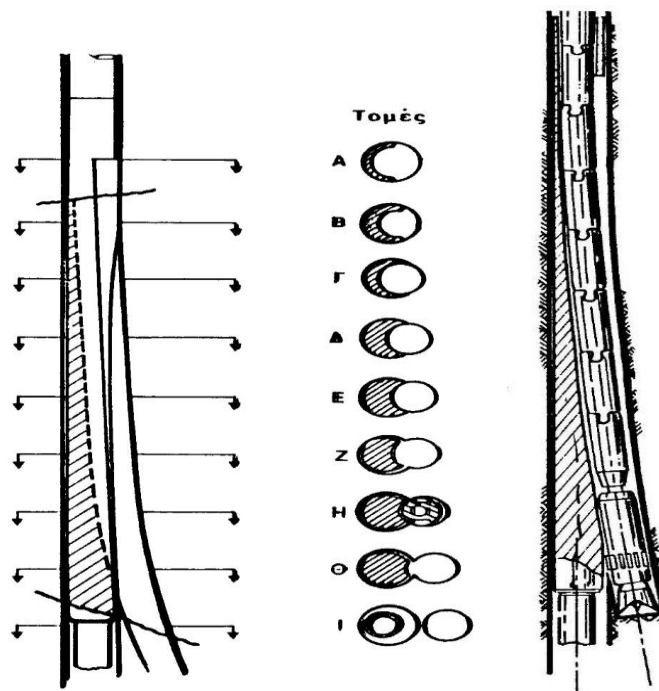
Τα βασικότερα όργανα πρόσδωσης παρέκκλισης είναι :

1. Σφήνες (Whipstocks)
2. Κοπτικά άκρα εκτόξευσης κυκλοφορούντων ρευστών (jetting bits)
3. Αντίβαρα σταθερής ή μεταβλητής κλίσης (bent subs) και κινητήρες πυθμένα λάσπης (mud motors)
4. Διατάξεις κατώτερης συνδεσμολογίας (Bottom Hole Assembly-B.H.A)

1.6.1. Σφήνες

Πρόκειται για χαλύβδινη σφήνα η οποία καθελκύεται μέσω της γεώτρησης και τοποθετείται στο σημείο πρώτης παρέκκλισης (ΚΟΡ). Ο σκοπός της σφήνας είναι να διαμορφώσει συγκεκριμένη δίοδο (πέραςμα) του κοπτικού που το προσανατολίζει σταδιακά ώστε να αποκλίνει από την κατακόρυφο πορεία (Εικόνα 1.20). Ο εξοπλισμός

αυτός συνήθως χρησιμοποιείται σε σωληνωμένη γεώτρηση οπότε, ειδικό κοπτικό εργαλείο που διαθέτει λεπίδες, δημιουργεί την οπή οδηγό για να ξεκινήσει η παρέκκλιση.



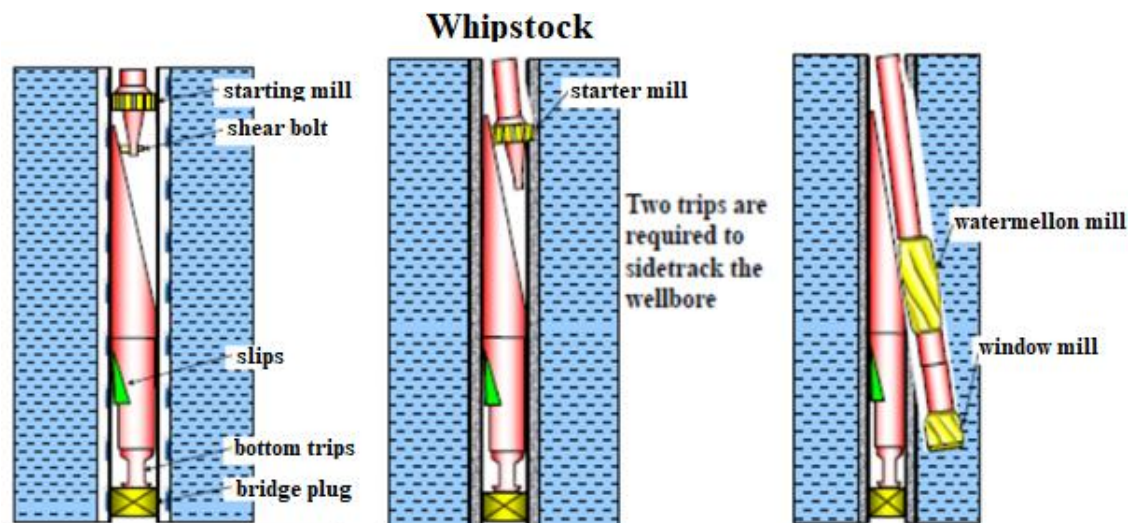
Εικόνα 1.20 : Σταδιακή παρέκκλιση του κοπτικού από τον κατακόρυφο άξονα

Συμβατικές μόνιμες ή ανακτήσιμες σφήνες

Το εξάρτημα διαθέτει μία κοίλη πλευρά μέσω της οποίας σταθεροποιείται και οδηγείται το κοπτικό στην επιθυμητή πορεία. Ο πυθμένας της είναι είτε πακτωμένος είτε στερεώνεται με ειδικό πύρο έτσι ώστε να αποτραπεί η περιστροφή της. Οι ανακτήσιμες σφήνες διαθέτουν στην κορυφή άγκιστρο από το οποίο θα ανελκυθεί στην συνέχεια

Στην Εικόνα 1.21 φαίνεται μία σφήνα μόνιμης πάκτωσης όπως και το ειδικό κοπτικό που θα δημιουργήσει την οπή-οδηγό στην σωλήνωση της γεώτρησης. Διαθέτει πλευρική σμίλη και πυθμενικό στέλεχος για την σταθεροποίηση της.

Είναι γεγονός ότι η διαδικασία έναρξης παρέκκλισης της γεώτρησης με τη χρήση σφήνας είναι μια χρονοβόρα διαδικασία καθώς απαιτεί πολλαπλές ανελκύνσεις και καθελκύνσεις της διατρητικής στήλης για την εναλλαγή εξαρτημάτων και κοπτικών όπως επίσης και λόγω καθέλκυσης και ανέλκυσης της σφήνας. (Hossain, και συν., 2015)



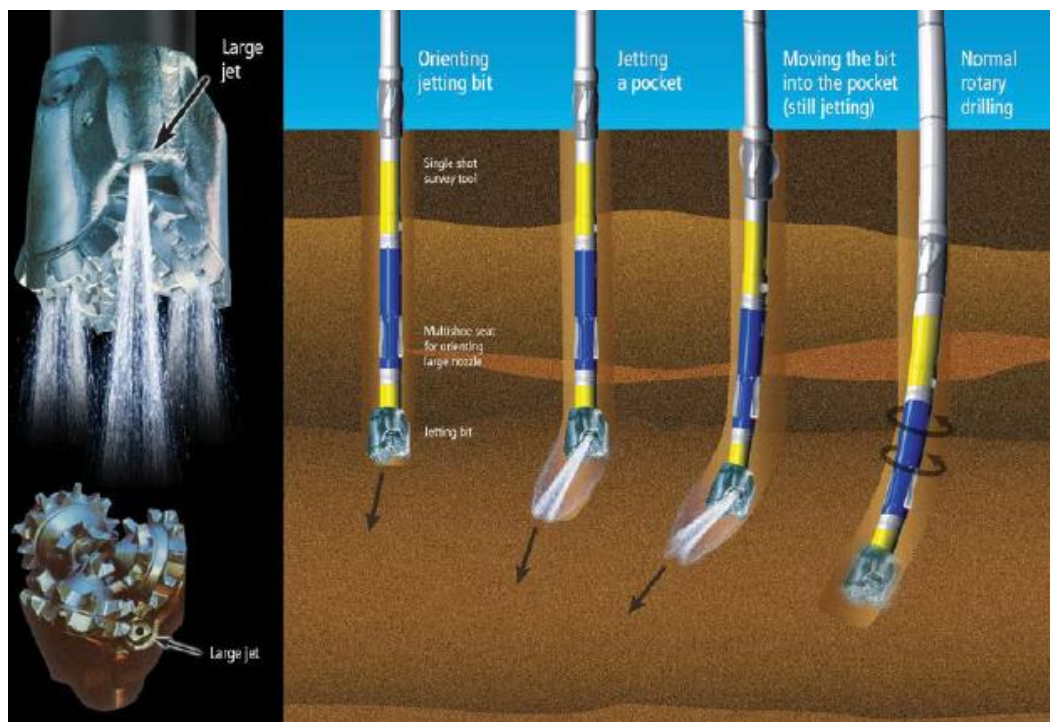
Εικόνα 1.21 : Κινήσεις του κοπτικού για την έναρξη παρέκκλισης

1.6.2. Κοπτικά άκρα εκτόξευσης κυκλοφορούντων ρευστών (jetting bits)

Χρησιμοποιούνται κοπτικά με ειδικά διαμορφωμένα ακροφύσια σε προσανατολισμό και μέγεθος (Εικόνα 1.22) μέσω των οποίων εκτοξεύεται υπό υψηλή πίεση το ρευστό διάτρησης με αποτέλεσμα την στοχευμένη έκπλυση του σχηματισμού. Το μεγαλύτερο σε μέγεθος ακροφύσιο, τοποθετείται κατά τον προσανατολισμό που επιθυμείται να ακολουθήσει η γεώτρηση. Η διατρητική στήλη δεν περιστρέφεται έως ότου δημιουργηθεί η επιθυμητή δίοδος λόγω της έκπλυσης και στη συνέχεια τίθεται σε περιστροφή για τη συνέχιση της διάτρησης (Εικόνα 1.23). Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε μαλακούς κυρίως σχηματισμούς.



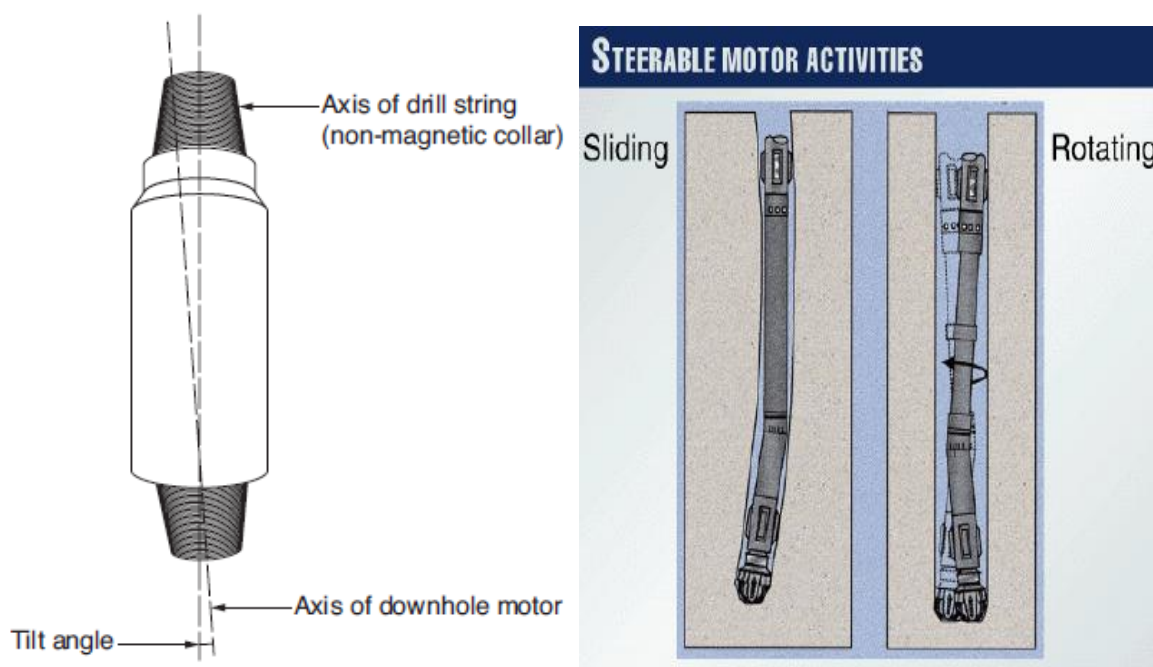
Εικόνα 1.22 : Κοπτικά με ειδικά διαμορφωμένα ακροφύσια σε προσανατολισμό και μέγεθος



Εικόνα 1.23 : Διαδικασία πρόσδωσης παρέκκλισης μέσω κοπτικών άκρων εκτόξευσης κυκλοφορούντων ρευστών (Hossain, και συν., 2015)

1.6.3. Αντίβαρο σταθερής ή μεταβλητής κλίσης και κινητήρες πυθμένα λάσπης

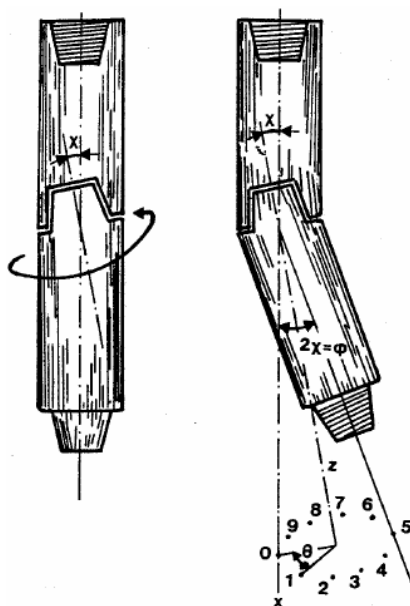
Η πιο διαδεδομένη τεχνική για την αλλαγή της κλίσης και του αζιμούθιου μιας γεώτρησης είναι με την χρήση αντίβαρων υπό κλίση σε συνδυασμό με κινητήρες πυθμένα (*Positive Displacement Motor, PDM*). Το κεκλιμένο αντίβαρο είναι σωλήνας μικρού μήκους σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο άξονας του κατώτερου σπειρώματος να παρεκκλίνει απ τον οριζόντιο όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.24. Ως εκ τούτου, το κοπτικό είναι επίσης μετατοπισμένο σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα οπότε είναι αδύνατο να περιστρέφεται ολόκληρη η διατρητική στήλη. Σε περίπτωση που περιστρεφόταν ολόκληρη η διατρητική στήλη θα συνεπαγόταν την συνολική περιστροφή της κατώτερης συνδεσμολογίας (όχι την περιστροφή του κοπτικού μόνον) με αποτέλεσμα την απόξεση των τοιχωμάτων της γεώτρησης Εικόνα 1.24. Απαραίτητη λοιπόν είναι η χρήση κινητήρων πυθμένα (PDM) οι οποίοι ενεργοποιούνται καθώς η λάσπη διέρχεται μέσω αυτών και προσδίδουν την απαιτούμενη περιστροφή στο κοπτικό άκρο. Η χρήση τους συνδέεται άμεσα με το σχεδιασμό και την ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων οδήγησης της γεώτρησης, δηλαδή χαρακτηριστικών διατάξεων του κατώτερου τμήματος της διατρητικής στήλης που στην απλούστερη μορφή τους περιλαμβάνουν ένα αντίβαρο υπό κλίση, τον κινητήρα πυθμένα και το κοπτικό άκρο.



Εικόνα 1.24 : Αντίβαρο σταθερής κλίσης (αριστερά) (Ford, 2017), σύστημα οδήγησης γεώτρησης (δεξιά)

Το σύστημα Telepilot

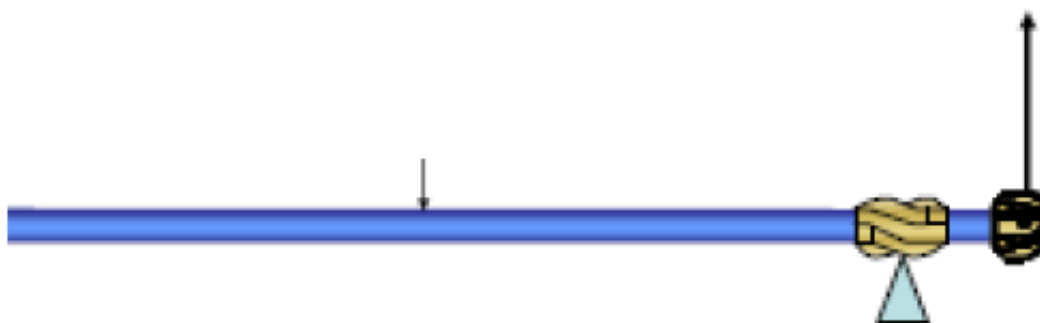
Κατασκευάστηκε για να αντιμετωπιστεί η ανάγκη ανέλκυσης της διατρητικής στήλης στην επιφάνεια κάθε φορά που απαιτείται μεταβολή στην πορεία της γεώτρησης και ως εκ τούτου τοποθέτηση άλλου τύπου αντίβαρων με παρέκκλιση (*bend-subs*). Αποτελείται από ένα αντίβαρο με μεταβλητή κλίση, η λειτουργία του οποίου καθορίζεται από την επιφάνεια. Σε μια σειρά δέκα διαφορετικών θέσεων, το αντίβαρο αυτό μπορεί να πραγματοποιήσει στροφή 360° στο οριζόντιο επίπεδο, με ταυτόχρονη μεταβολή στη γωνία κλίσης (από 0° ως μια μέγιστη τιμή που συνήθως είναι 2,5° ή 3°). Η επιθυμητή γωνία κλίσης επιλέγεται από την επιφάνεια με τηλεχειρισμό (ως εκ τούτου και ο χαρακτηρισμός του ως *remote controlled bent- sub*).



Εικόνα 1.25 : Τηλεχειριζόμενο αντίβαρο με κλίση

1.6.4. Διατάξεις Bottom Hole Assembly (B.H.A.)

Πρόκειται για την κατώτερη συνδεσμολογία της διατρητικής στήλης. Αποτελείται από το κοπτικό άκρο, τα αντίβαρα, τους σταθεροποιητές και τον κινητήρα πυθμένα (προαιρετικά). Η συνδεσμολογία καλείται να εφαρμόσει κατάλληλο βάρος επί του κοπτικού να εξασφαλίσει ομαλή διατομή και διάμετρο του πηγαδιού καθώς και να παρέχει την δυνατότητα κατευθυνόμενης οδήγησης της γεώτρησης.

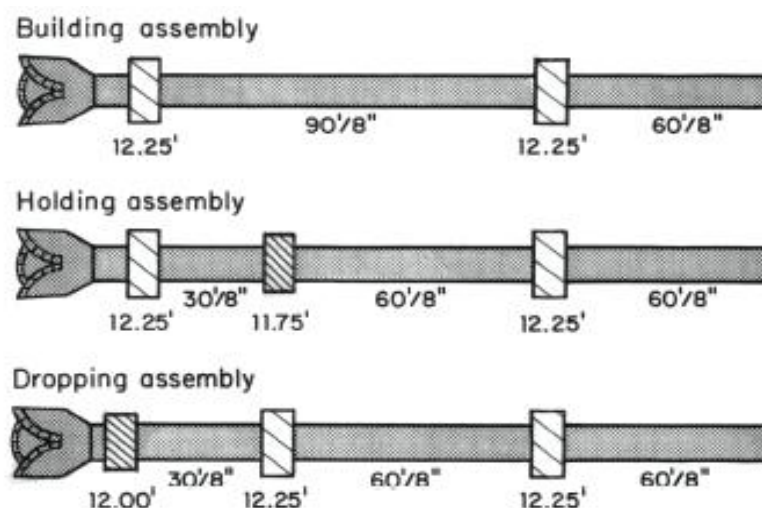


Εικόνα 1.26 : Τάσεις που ασκούνται επί της διάταξης B.H.A.

Η τάση μιας συμβατικής κατώτερης συνδεσμολογίας να μεταβάλλει την γωνία κλίσης ή το αζιμούθιο της γεώτρησης σχετίζεται με την ευκαμψία της. Όλα τα μέρη της διατρητικής στήλης είναι εύκαμπτα ως ένα βαθμό (ακόμη και τα ευμεγέθη και βαριά αντίβαρα) έτσι και η B.H.A. θα λυγίσει μόλις εφαρμοστεί κατάλληλο βάρος επί του κοπτικού. Οι σταθεροποιητές τοποθετούνται σε επιλεγμένο αριθμό, θέσεις και αποστάσεις μεταξύ τους, αλλά και σε επιλεγμένη απόσταση από το κοπτικό άκρο, ώστε, ανάλογα με το σχεδιασμό

τοποθέτησης να λειτουργούν ως υπομόχλια (Εικόνα 1.26). Οι σταθεροποιητές αποτελούν σημεία επαφής της κατώτερης συνδεσμολογίας με τα τοιχώματα της γεώτρησης με αποτέλεσμα να ενισχύεται η πλευρική τάση επί του κοπτικού.

Στην Εικόνα 1.27 φαίνονται βασικές διατάξεις θέσεων και αριθμού σταθεροποιητών, ανάλογα με την επιδιωκόμενη παρέκκλιση.



Εικόνα 1.27 : Διατάξεις κατώτερης συνδεσμολογίας διατρητικής στήλης (Ford, 2017)

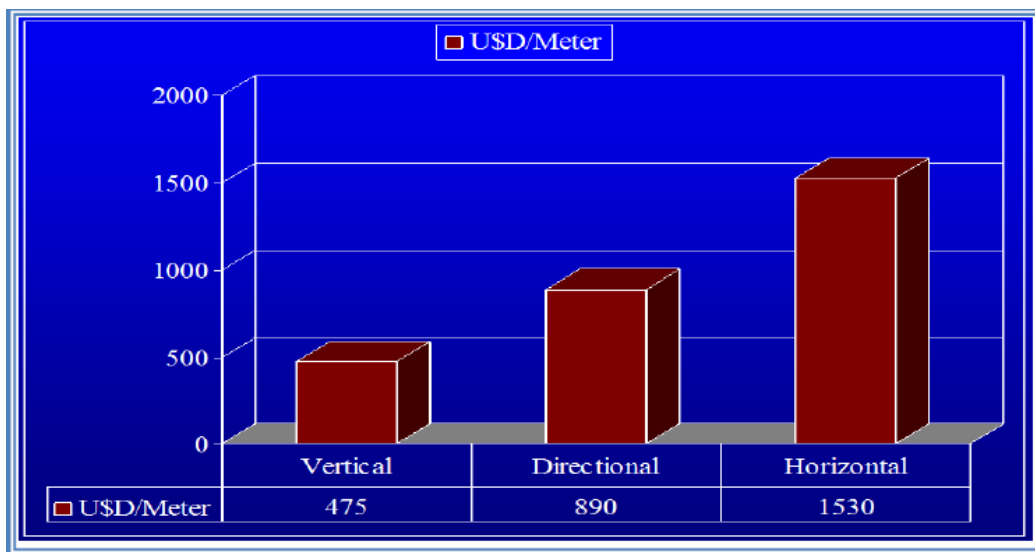
1.7. Οικονομικά στοιχεία

Η λήψη της απόφασης σχετικά με την εφαρμογή μεθόδων κατευθυνόμενης διάτρησης εξαρτάται κυρίως από οικονομικούς παράγοντες. Το κόστος των κεκλιμένων και οριζοντίων γεωτρήσεων είναι μεγαλύτερο των κατακόρυφων κατά 20% με 25%. Το αυξημένο κόστος προκύπτει λόγω διαφόρων παραγόντων όπως ο χρόνος από την έναρξη έως την αποπεράτωση της διάτρησης είναι σημαντικά αυξημένος και σε συνδυασμό με την ανάγκη πρόσθετου και ειδικού εξοπλισμού, το συνολικό κόστος του έργου μεγαλώνει. Τα μεγάλα βάθη όρυξης τέτοιων γεωτρήσεων εγκυμονούν μεγαλύτερους κινδύνους για εμφάνιση αυξημένων πιέσεων και προβλημάτων ελέγχου της γεώτρησης. Όσο πιο σύνθετη είναι η τροχιά της γεώτρησης (π.χ. τύπου S), το κόστος αυξάνει.

Στην Εικόνα 1.28 παρουσιάζονται κόστη σε USD ανά μέτρο διάτρησης σε πηγάδια πετρελαϊκού πεδίου του Σουδάν όπως καταγράφηκαν το 2006. Φαίνεται ότι :

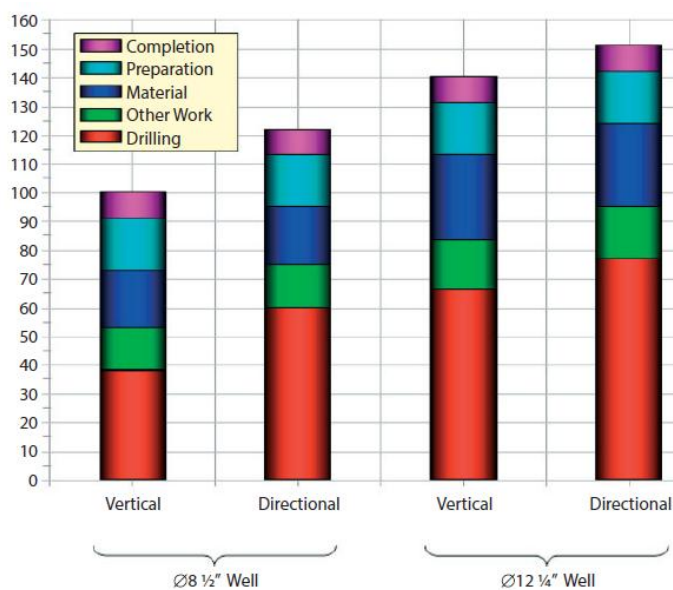
1. Υψηλότερο είναι το κόστος διάνοιξης οριζόντιων γεωτρήσεων (1530 USD/m).

2. Έπειτα το κόστος όρυξης κεκλιμένων γεωτρήσεων (890 USD/m).
3. Τέλος ακολουθούν οι κατακόρυφες γεωτρήσεις με κόστος 475 USD/m.



Εικόνα 1.28 : Κόστη κατακόρυφης, οριζόντιας και κεκλιμένης γεώτρησης

Στην Εικόνα 1.29 παρουσιάζονται τα κόστη κατακόρυφων γεωτρήσεων σε σχέση με τις κεκλιμένες για δύο διαφορετικές διαμέτρους διατομής του πηγαδιού. Σε κάθε περίπτωση (ανεξαρτήτως της διαμέτρου διατομής) το κόστος μίας κεκλιμένης γεώτρησης είναι υψηλότερο. Επίσης φαίνεται πως το κόστος κάθε τύπου γεώτρησης είναι υψηλότερο όσο μεγαλύτερη είναι και η διάμετρος του πηγαδιού.



Εικόνα 1.29 Συγκριτικά κόστη κατακόρυφων και κεκλιμένων γεωτρήσεων σε σχέση με τη διάμετρο της γεώτρησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχεδιασμός κεκλιμένων γεωτρήσεων

2.1. Σχεδιασμός κατακόρυφης προβολής τροχιάς τύπου **Build & Hold**

2.1.1. Θεωρητικός σχεδιασμός

Το πρώτο στάδιο σχεδιασμού οποιασδήποτε κατευθυνόμενης γεώτρησης περιλαμβάνει τη χάραξη της τροχιάς που θα ακολουθηθεί με σκοπό την προσέγγιση σχηματισμού στόχου με γνωστές συντεταγμένες και βάθος. Μέσω του αρχικού σχεδιασμού θα πρέπει να προτείνονται διάφορες τροχιές οι οποίες θα μπορούσαν να ορυχθούν με γνώμονα το χαμηλό κόστος. Ο μετέπειτα σχεδιασμός στηρίζεται την επίδραση των γεωλογικών σχηματισμών επί της διάταξης της κατώτερης συνδεσμολογίας (κοπτικό άκρο-διευρυντήρας-αρθρωτό εργαλείο-ειδικά αντίβαρα) - Bottom Hole Assembly-B.H.A που θα χρησιμοποιηθεί όπως και στην επίδραση άλλων παραγόντων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τελική πορεία της γεώτρησης.

Στο παρόν κεφάλαιο και στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής διατριβής αναφερόμαστε στον αρχικό σχεδιασμό τροχιάς γεώτρησης τύπου **Build & Hold.**

2.1.2. Υπολογισμός βασικών γεωμετρικών παραμέτρων τροχιάς στο κατακόρυφο επίπεδο **X-Z**

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται μία απλής μορφής τροχιά γεώτρησης τύπου build and hold που προσεγγίζει στόχο σε βάθος TVD_{target} (στην Εικόνα 2.1 ως D_3) και οριζόντια μετατόπιση HD_{target} (στην Εικόνα 2.1 ως X_3) (σημείο Β). Το βάθος του σημείου έναρξης της παρέκκλισης ΚΟΡ στην Εικόνα 2.1 συμβολίζεται ως D_1 και ο ρυθμός αύξησης της γωνίας του καμπυλόγραμμου τμήματος BUR μετράται σε μοίρες ανά μονάδα μήκους.

Υπολογισμός ακτίνας καμπυλότητας **R**

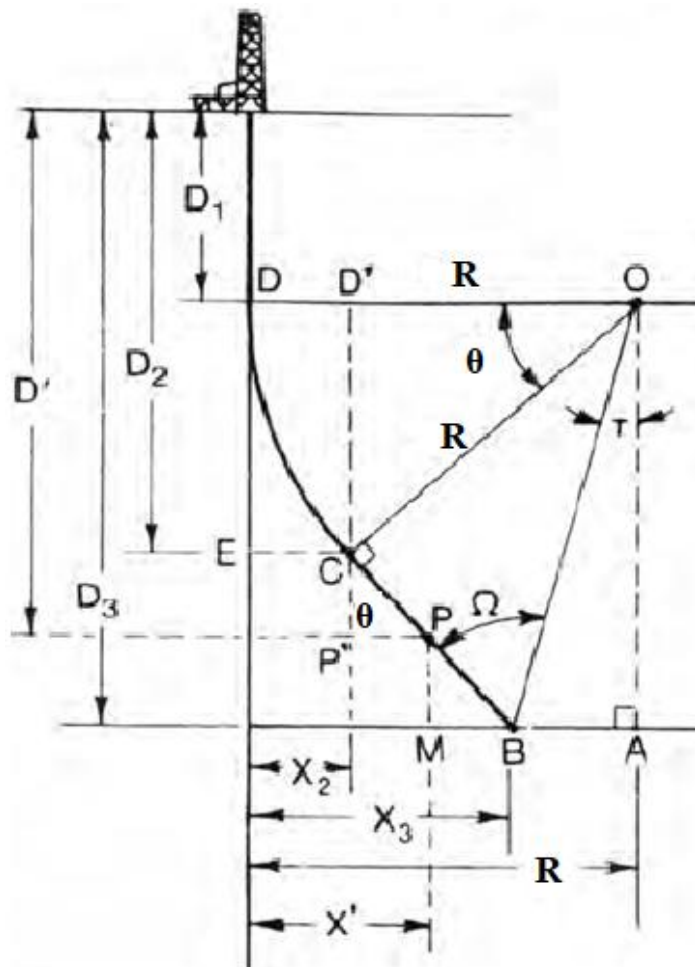
Το καμπυλόγραμμο τμήμα αποτελεί τόξο κύκλου, που διαγράφεται με ακτίνα καμπυλότητας R η οποία υπολογίζεται από τη σχέση (2.1) ως ακολούθως:

$$R = \frac{180}{\pi} \times \frac{1}{BUR} \quad (2.1)$$

Όπου :

R : ακτίνα καμπυλότητας (ft)

BUR : ρυθμός μεταβολής γωνίας κλίσης (deg/100ft)



Εικόνα 2.1 : Γεωμετρικά στοιχεία τροχιάς τύπου build and hold για $X_3 < r_1$.

Υπολογισμός γωνίας θ (μέγιστη γωνία κλίσης) (δεδομένων BUR-KOP)

Περίπτωση 1

Όταν η οριζόντια μετατόπιση του στόχου HD_{target} (στην Εικόνα 2.1 ως X_3) είναι μικρότερη της ακτίνας καμπυλότητας ($X_3 < R$), η γωνία θ υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης :

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D_3 - D_1}{R - X_3}\right) - \cos^{-1}\left\{\left(\frac{R}{D_3 - D_1}\right) \times \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{D_3 - D_1}{R - X_3}\right)\right]\right\} \quad (2.2)$$

Γενικά:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{TVD_{target} - KOP}{R - HD_{target}}\right) - \cos^{-1}\left\{\left(\frac{R}{TVD_{target} - KOP}\right) \times \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{TVD_{target} - KOP}{R - HD_{target}}\right)\right]\right\}$$

Η κατανόηση της σχέσης (2.2) γίνεται εύκολη με την παρατήρηση ότι οι γωνίες $\widehat{OBA} = \widehat{DOB}$ ως εντός και εναλλάξ.

Περίπτωση 2

Στην περίπτωση που η οριζόντια μετατόπιση του στόχου HD_{target} (στην Εικόνα 2.1 ως X_3) υπερβαίνει την ακτίνα καμπυλότητας ($R < X_3$) ισχύει η σχέση :

$$\theta = 180 - \tan^{-1}\left(\frac{D_3 - D_1}{X_3 - R}\right) - \cos^{-1}\left\{\left(\frac{R}{D_3 - D_1}\right) \times \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{D_3 - D_1}{X_3 - R}\right)\right]\right\} \quad (2.3)$$

Γενικά :

$$\theta = 180 - \tan^{-1}\left(\frac{TVD_{target} - KOP}{HD_{target} - R}\right) - \cos^{-1}\left\{\left(\frac{R}{TVD_{target} - KOP}\right) \times \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{TVD_{target} - KOP}{HD_{target} - R}\right)\right]\right\}$$

Όπου :

θ : η μέγιστη γωνία κλίσης του καμπυλόγραμμου τμήματος ή αλλιώς γωνία $\widehat{D'OC}$ (deg)

D_3 : το κατακόρυφο βάθος του στόχου (TVD_{target}) (ft)

D_1 : το κατακόρυφο βάθος του σημείου πρώτης παρέκκλισης (KOP) (ft)

X_3 : η οριζόντια μετατόπιση του στόχου (HD_{target}) (ft)

Επίλυση του προβλήματος με εναλλαγή δεδομένων και ζητούμενων

Οι εξισώσεις που παρατέθηκαν αφορούν τον υπολογισμό συγκεκριμένων παραμέτρων έχοντας κάποιες άλλες ως δεδομένα. Για παράδειγμα, με τις εξισώσεις (2.2) και (2.3) υπολογίστηκε η γωνία θ με δεδομένο το βάθος KOP (στην Εικόνα 2.1 ως D_1) και τον ρυθμό αύξησης καμπυλότητας (BUR). Οι εξισώσεις αυτές αναδιαμορφώθηκαν και το πρόβλημα επιλύθηκε εξ αρχής ώστε να μπορεί να υπολογίζεται κάθε παράμετρος, δεδομένων των υπολοίπων.

Υπολογισμός ρυθμού αύξησης γωνίας κλίσης (BUR) και ακτίνας καμπυλότητας (R) (δεδομένων θ -KOP)

Από την Εικόνα 2.1 παρατηρείται ότι :

$$TVD_{target} = D_3 = D_1 + D'C + CJ = KOP + \sin\theta \times R + \cos\theta \times CB$$

$$CB = \frac{TVD_{target} - KOP - \sin\theta \times R}{\cos\theta} \quad (2.4)$$

Όπως επίσης :

$$HD_{target} = X_3 = D'D + JB = R - R \times \cos\theta + \cos\theta \times CB \quad (2.5)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (2.5) ως προς R και αντικαθιστώντας το CB από την

(2.4) προκύπτει :

$$R = \frac{X_3 - \tan\theta \times D_3 + \tan\theta \times D_1}{1 - \cos\theta - \tan\theta \times \sin\theta} \quad (2.6)$$

Γενικά:

$$R = \frac{HD_{target} - \tan\theta \times TVD_{target} + \tan\theta \times KOP}{1 - \cos\theta - \tan\theta \times \sin\theta}$$

Άρα:

$$BUR = 180 / (\pi \times R), \text{ σε } \text{deg} / 100\text{ft} \quad (2.7)$$

Υπολογισμός βάθους σημείου πρώτης παρέκκλισης (KOP) (δεδομένων θ-BUR)

Αν οι παραπάνω εξισώσεις επιλυθούν με γνωστό το θ και το BUR, άρα και το R, η σχέση που θα προκύψει θα είναι :

$$D_1 = D_3 - \sin\theta \times R - \cot\theta \times X_3 + \cot\theta \times R - \cot\theta \times \cos\theta \times R \quad (2.8)$$

Γενικά:

$$KOP = TVD_{target} - \sin\theta \times R - \cot\theta \times HD_{target} + \cot\theta \times R - \cot\theta \times \cos\theta \times R$$

Όπου:

θ : η μέγιστη γωνία κλίσης του καμπυλόγραμμου τμήματος ή αλλιώς γωνία \widehat{DOC} (deg)

D_3 : το κατακόρυφο βάθος του στόχου (TVD_{target}) (ft)

D_1 : το κατακόρυφο βάθος του σημείου πρώτης παρέκκλισης (KOP) (ft)

X_3 : η οριζόντια μετατόπιση του στόχου (HD_{target}) (ft)

R : ακτίνα καμπυλότητας (ft)

Υπολογισμός οριζόντιας μετατόπισης

Η οριζόντια μετατόπιση στο σημείο που τελειώνει το καμπυλόγραμμο τμήμα Build up $HD_{End\ of\ Build}$ (στην Εικόνα 2.2 ως X_2 , σημείο C) υπολογίζεται από το τρίγωνο D'OC.

$$X_2 = HD_{End\ of\ Build} = R - R \times \cos\theta \quad (2.9)$$

Υπολογισμός μετρούμενων βαθών

Το μετρούμενο βάθος έως το σημείο που τελειώνει το καμπυλόγραμμο τμήμα Build up $MD_{end\ of\ build}$ άρα το μήκος του τόξου DC είναι :

$$MD_{end\ of\ build} = \frac{\theta}{BUR} \quad (2.10)$$

Αντίστοιχα το κατακόρυφο βάθος του σημείου που τελειώνει το καμπυλόγραμμο τμήμα $TVD_{end\ of\ build}$ (στην Εικόνα 2.2 ως D_2 (σημείο C) δίνεται από τον τύπο :

$$D_2 = TVD_{end\ of\ build} = D_1 + R \times \sin \theta \quad (2.13)$$

Υπολογισμός παραμέτρων τυχαίου σημείου επί του καμπυλόγραμμου τμήματος

Για τον ορισμό της θέσης κάθε σημείου επί του καμπυλόγραμμου τμήματος πρέπει να είναι γνωστά:

- ❖ Το μετρούμενο βάθος (MD)
- ❖ Την οριζόντια μετατόπιση (HD)
- ❖ Το κατακόρυφο βάθος (TVD)

Για παράδειγμα, στο σημείο C' επί του καμπυλόγραμμου τμήματος της Εικόνα 2.3 το μέρος του καμπυλόγραμμου τμήματος που έως αυτό το σημείο έχει διαγραφεί, αντιστοιχεί σε μια γωνία θ' . Να σημειωθεί πως η γωνία θ' (γωνία $\widehat{DOC'}$) ισούται με την γωνία $\widehat{AC'B}$ ως γωνίες με κάθετες πλευρές. Άρα η γωνία θ' είναι η γωνία κλίσης (Inclination Angle) κάθε σημείου του καμπυλόγραμμου τμήματος αφού αποτελεί την γωνία μεταξύ της κατακόρυφης διεύθυνσης και της εφαπτομένης στο κάθε σημείο. Στο τέλος του καμπυλόγραμμου τμήματος η γωνία θ' παίρνει την μέγιστη τιμή της (έχει οριστεί ως θ) και αντιπροσωπεύει τόσο την γωνία που έχει διαγραφεί για την χάραξη του καμπυλόγραμμου τμήματος όσο και την μέγιστη γωνία κλίσης με την οποία θα προσεγγιστεί ο στόχος. Για το τυχαίο σημείο C', υπολογίζεται το μετρούμενο βάθος του, η οριζόντια μετατόπιση του και το κατακόρυφο βάθος του, με δεδομένα:

- ❖ Το βάθος του σημείου πρώτης παρέκκλισης Kick off Point –KOP (στην Εικόνα 2.3 ως D_1)
- ❖ Τον ρυθμό αύξησης γωνίας κλίσης (BUR), άρα και την ακτίνα καμπυλότητας R (μέσω σχέσης (2.1))
- ❖ Την γωνία θ'

Το κατακόρυφο βάθος TVD (στην Εικόνα 2.3 ως D_N) δίνεται από την σχέση:

$$D_N = TVD_{C'} = D_1 + R \times \sin \theta' \quad (2.14)$$

Η οριζόντια μετατόπιση (στην Εικόνα 2.3 ως X_N) δίνεται από την σχέση:

$$X_N = HD_{C'} = R - R \times \cos \theta' \quad (2.15)$$

Το μετρούμενο βάθος D_{MN} δίνεται από την σχέση:

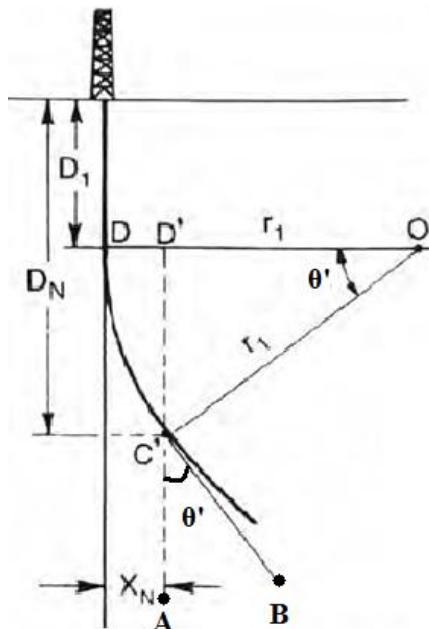
$$MD_P = D_1 + \frac{\theta'}{BUR} \quad (2.16)$$

Όπου :

R : ακτίνα καμπυλότητας (ft)

BUR : ρυθμός μεταβολής γωνίας κλίσης (deg/100ft)

D_1 : το κατακόρυφο βάθος του σημείου πρώτης παρέκκλισης (KOP) (ft)



Εικόνα 2.3 : Η γεωμετρία του καμπυλόγραμμου τμήματος (Build up)

Υπολογισμός παραμέτρων τυχαίου σημείου επί του εφαπτομενικού τμήματος

Ανάλογες είναι οι απαιτήσεις και για κάθε σημείο επί του εφαπτομενικού τμήματος της τροχιάς (π.χ. σημείο P, Εικόνα 2.4) με δεδομένο το κατακόρυφο βάθος του.

Μετρούμενο βάθος του σημείου P:

$$MD_P = D_1 + \frac{\theta}{BUR} + CP \quad (2.17)$$

$$CP = \frac{CP'}{\cos \theta} \quad (2.18)$$

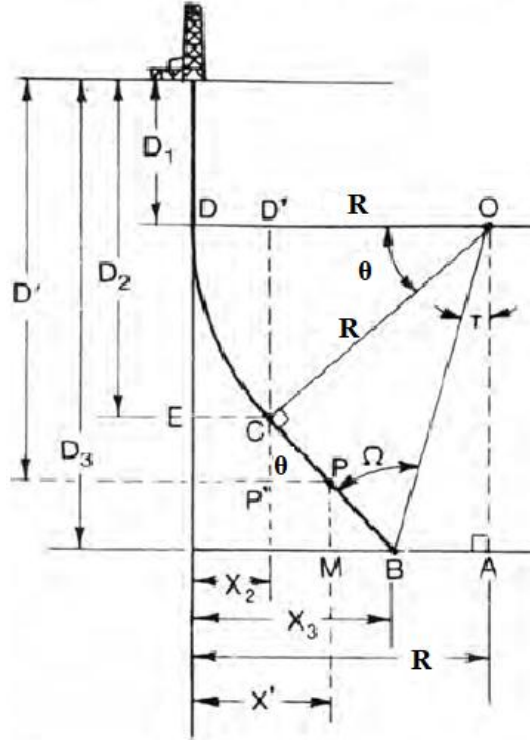
$$CP' = D' - D_2 = D' - D_1 - R \times \sin \theta \quad (2.19)$$

Όπου :

$\theta BUR = MD_{End\ of\ Build}$ όπως αποδείχθηκε στην σχέση (2.10)

D' : η οριζόντια μετατόπιση (HD) στο τέλος του καμπυλόγραμμου - End of Build (σημείο C)

D_2 : το κατακόρυφο βάθος στο τέλος του καμπυλόγραμμου - End of Build (σημείο C)



Εικόνα 2.4: Γεωμετρικά στοιχεία τροχιάς τύπου Build and Hold

Άρα:

$$MD_P = D_1 + \frac{\theta}{BUR} + \frac{D' - D_1 - R \times \sin \theta}{\cos \theta} \quad (2.20)$$

Οριζόντια μετατόπιση του σημείου P:

$$X' = HD_P = X_2 + P'P \quad (2.21)$$

Όπου το μήκος του τμήματος PP' είναι:

$$P'P = CP' \times \tan \theta \quad (2.22)$$

Από τις τρεις εξισώσεις (2.9), (2.22) και (2.19) προκύπτει :

$$X' HD_P = R(1 - \cos \theta) + (D' - D_1 - R \times \sin \theta) \times \tan \theta \quad (2.23)$$

2.2. Σχεδιασμός οριζόντιας προβολής τροχιάς τύπου **Build & Hold**

2.2.1. Θεωρητικός σχεδιασμός τροχιάς με συνεχώς μεταβαλλόμενο αζιμούθιο

Το πρώτο βήμα για τον σχεδιασμό μίας γεώτρησης είναι ο καθορισμός της τροχιάς στο κατακόρυφο επίπεδο (X-Z). Το επόμενο βήμα αφορά τον προσδιορισμό της τροχιάς στο οριζόντιο επίπεδο (X-Y) όπου ουσιαστικά καθορίζεται η μεταβολή του αζιμούθιου, θεωρώντας σταθερή την γωνία κλίσης.

Η τεχνική που ακολουθείται για αυτόν τον σκοπό συνίσταται στην πρόσδωση μίας κλίσης οδήγησης του κοπτικού (lead angle) σχετικά με το αζιμούθιο του σχηματισμού στόχου. Η γωνία αυτή λαμβάνει τιμές συνήθως από 5 έως 25 μοίρες ενώ η επιλογή βασίζεται κυρίως στην εμπειρία που έχει αποκτηθεί λόγω διάτρησης γειτονικών γεωτρήσεων ή όρυξης υπό παρόμοιες γεωλογικές συνθήκες.

Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται η προβολή της τροχιάς μιας γεώτρησης με συνεχώς μεταβαλλόμενο αζιμούθιο στο οριζόντιο επίπεδο. Στην περίπτωση που μεταβάλλεται μόνο η κλίση και το αζιμούθιο παραμένει σταθερό, η οριζόντια προβολή της τροχιάς θα είναι ευθεία. Στην περίπτωση που μεταβάλλεται το αζιμούθιο, η προβολή της τροχιάς θα είναι καμπύλη όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.5 όπου:

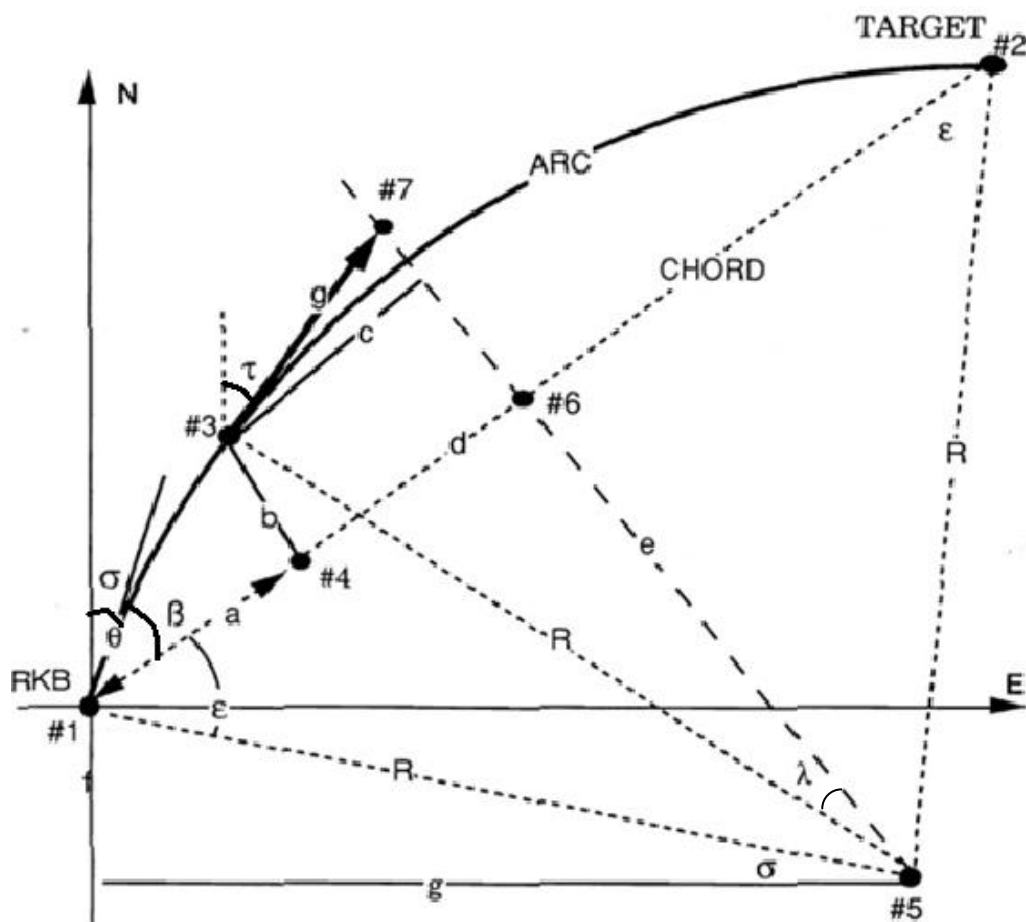
- ❖ Το σημείο 1 αντιπροσωπεύει την εξέδρα του γεωτρήπανου
- ❖ Το σημείο 2 την προβολή του στόχου επί του οριζοντίου επιπέδου
- ❖ Το σημείο 3 αποτελεί τυχαίο σημείο επί της τροχιάς (ζητούμενο) με συντεταγμένες N_3 (Northing) και E_3 (Easting) και αζιμούθιο (Azimuth) (στην Εικόνα 2.5. ως τ)
- ❖ Το σημείο 5 είναι το κέντρο του κύκλου από τον οποίο διαγράφεται το τόξο (ARC) με ακτίνα R.

Ουσιαστικά, η εξέδρα του γεωτρήπανου (σημείο 1) ενώνεται με την προβολή του στόχου στην επιφάνεια (σημείο 2) μέσω ενός τόξου (ARC). Το καμπυλόγραμμο αυτό τμήμα διαγράφεται με σταθερό ρυθμό μεταβολής αζιμούθιου.

Σε μία τέτοια περίπτωση τα γνωστά μεγέθη περιλαμβάνουν :

- ❖ Την γωνία οδήγησης του κοπτικού (lead angle), (στην Εικόνα 2.5 ως β)
- ❖ Τις συντεταγμένες του στόχου Easting και Northing (στην Εικόνα 2.5, σημείο 2 ως E_2 και N_2)

- ❖ Την απόσταση, a , που αναπαριστά την προβολή της θέσης του ζητούμενου σημείου 3 επί της χορδής (CHORD)



Εικόνα 2.5 : Η γεωμετρία της τροχιάς γεωτρήσης όπως προβάλλεται στο οριζόντιο επίπεδο (Mitchell, 1995).

Στόχος είναι ο σχεδιασμός της οριζόντιας προβολής της τροχιάς στο οριζόντιο επίπεδο, για τον λόγο αυτό πρέπει να είναι γνωστή η θέση κάθε τυχαίου σημείου της (π.χ. σημείο 3) επομένως υπολογίζονται τα παρακάτω :

- ❖ Οι συντεταγμένες (E_3, N_3) του τυχαίου σημείου 3
- ❖ Το αζιμούθιο (Azimuth) (στην Εικόνα 2.5 ως τ) του τυχαίου σημείου 3

Επιπλέον υπολογίζονται :

- ❖ η ακτίνα του τόξου (R) και
- ❖ ο ρυθμός αύξησης η μείωσης του αζιμούθιου (Turn Rate)

Οι συμβολισμοί των μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν για την απόδειξη που ακολουθεί αναφέρονται στην Εικόνα 2.5.

Το μήκος της ευθείας που ενώνει την εξέδρα του γεωτρήσανου με την προβολή του στόχου στην επιφάνεια (CHORD) δίνεται από τον τύπο :

$$Chord\ Length = \sqrt{N_2^2 + E_2^2} \quad (2.24)$$

Η ακτίνα καμπυλότητας του τόξου (της τροχιάς) θα είναι :

$$R = \frac{Chord\ Length}{2 \times \cos \varepsilon}, \text{ ενώ η γωνία } \varepsilon \text{ είναι: } \varepsilon = 90 - \beta \quad (2.25)$$

Για τον υπολογισμό του ρυθμού αύξησης ή μείωσης του αζιμούθιου :

$$Turn\ Rate = \frac{100}{R \frac{\pi}{180}}, \text{ σε } \left(\frac{deg}{100ft}\right) \quad (2.26)$$

Αντίστοιχα αφού η περίμετρος ενός κύκλου είναι $L = 2 \times \pi \times R$ προκύπτει πως το μήκος του τόξου είναι :

$$Length\ of\ the\ arc = R \times (180 - 2\varepsilon) \times \frac{\pi}{180} \quad (2.27)$$

Στη συνέχεια προϋπολογίζονται τα μήκη ευθυγράμμων τμημάτων και γωνιών που θα χρησιμοποιηθούν για την εύρεση των **συντεταγμένων κάθε σημείου της τροχιάς** (E_3, N_3). Υπολογίζονται :

$$\text{το ευθύγραμμο τμήμα } e = R \times \sin \varepsilon$$

$$\text{το ευθύγραμμο τμήμα } d = R \times \cos \varepsilon$$

$$\alpha = given$$

$$\text{το ευθύγραμμο τμήμα } c = d - a$$

$$\text{η γωνία } \lambda = a \times \sin \frac{c}{R}$$

$$\text{το ευθύγραμμο τμήμα } b = R \times (\cos \lambda - \sin \varepsilon)$$

$$\text{η γωνία } \theta = a \times \tan \frac{E_2}{N_2}$$

$$\text{η γωνία } \sigma = \theta - \beta$$

Οι συντεταγμένες του σημείου 5 δίνονται από τις εξισώσεις :

$$N_5 = R \times \sin \sigma$$

$$E_5 = R \times \cos\sigma$$

$$\cos \alpha_{1-2} = \frac{N_2}{CHORD}$$

$$\cos \beta_{1-2} = \frac{E_2}{CHORD}$$

Οι συντεταγμένες του σημείου 6 δίνονται από τις εξισώσεις :

$$N_6 = d \times \cos\alpha_{1-2}$$

$$E_6 = d \times \cos\alpha_{1-2}$$

$$\cos \alpha_{5-6} = \frac{N_6 - N_5}{e}$$

$$\cos \beta_{5-6} = \frac{E_6 - E_5}{e}$$

Οι συντεταγμένες του σημείου 4 δίνονται από τις εξισώσεις :

$$N_4 = a \times \cos\alpha_{1-2}$$

$$E_4 = a \times \cos\beta_{1-2}$$

Οι συντεταγμένες του σημείου 3 δίνονται από τις εξισώσεις :

$$N_3 = b \times \cos\alpha_{5-6} + N_4 \quad (2.28)$$

$$E_3 = b \times \cos\beta_{5-6} + E_4 \quad (2.29)$$

Οι υπολογισμοί που ακολουθούν έχουν σκοπό **την εύρεση του αζιμούθιου (Azimuth)** (στην Εικόνα 2.5. ως τ) του τυχαίου σημείου επί της τροχιάς (σημείο 3):

$$\cos \alpha_{3-5} = \frac{N_5 - N_3}{R}$$

$$\cos \beta_{3-5} = \frac{E_5 - E_3}{R}$$

$$Length_{5-7} = \frac{R}{\cos\lambda}$$

$$Length_{3-7} = R \times \tan\lambda$$

Οι συντεταγμένες του σημείου 7 δίνονται από τις εξισώσεις:

$$N_7 = Length_{5-7} \times \cos\alpha_{5-6} + N_5$$

$$E_7 = Length_{5-7} \times \cos\beta_{5-6} + E_5$$

$$\cos \alpha_{3-7} = \frac{N_7 - N_3}{Length_{3-7}}$$

$$\cos \beta_{3-7} = \frac{E_7 - E_3}{Length_{3-7}}$$

Τέλος το αζιμούθιο του ζητούμενου σημείου 3 θα είναι :

$$Azimuth = a \times \tan \frac{\cos\beta_{3-7}}{\cos\alpha_{3-7}} \quad (2.30)$$

2.2.2. Σχεδιασμός οριζόντιας προβολής σύνθετης τροχιάς με σταθερό και μεταβαλλόμενο αζιμούθιο.

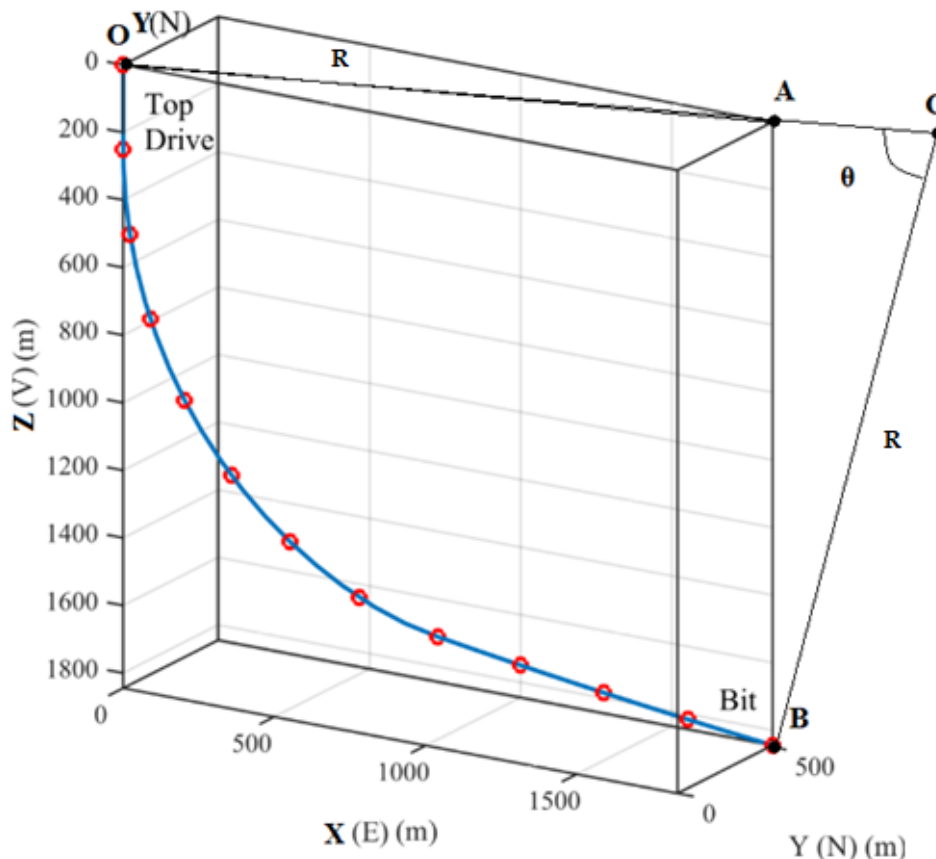
Σχεδιασμός τμήματος της τροχιάς με σταθερό αζιμούθιο

Με το μοντέλο που παρουσιάστηκε ουσιαστικά υπολογίζονται οι συντεταγμένες κάθε σημείου ενός τόξου κύκλου με σημείο έναρξης την εξέδρα του γεωτρύπανου και πέρας την προβολή του στόχου στην επιφάνεια. Άρα η συγκεκριμένη μεθοδολογία δίνει την δυνατότητα υπολογισμού τροχιάς που θα αποτελείται μόνο από τμήμα μεταβαλλόμενου αζιμούθιο. Πολλές φορές υπάρχει η ανάγκη σχεδιασμού της γεώτρησης με τέτοιο τρόπο ώστε, μετά την έναρξη της παρέκκλισης, το αζιμούθιο να διατηρηθεί σταθερό μέσω μια προκαθορισμένης γωνίας οδήγησης του κοπτικού (lead angle) και για μία επίσης καθορισμένη απόσταση προχώρησης, και στη συνέχεια να ξεκινήσει να παρεκκλίνει ως προς το αρχικό αζιμούθιο προς την κατεύθυνση του στόχου. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού οι εξισώσεις που προηγήθηκαν, τροποποιήθηκαν ώστε να συμπεριληφθούν και τα νέα μεγέθη όπως:

- Το μετρούμενο μήκος (MD) του αρχικού τμήματος που ορύσσεται με σταθερό αζιμούθιο.
- Ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης (BUR) του αρχικού τμήματος που ορύσσεται με σταθερό αζιμούθιο.

Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται το παράδειγμα ενός καμπυλόγραμμου τμήματος το οποίο ορύσσεται με σταθερό αζιμούθιο και σταθερό ρυθμό αύξησης καμπυλότητας. Η προβολή του τμήματος αυτού στο κατακόρυφο επίπεδο X-Z είναι καμπύλη, ενώ η προβολή του στο οριζόντιο επίπεδο Ψ-X είναι ευθύγραμμο τμήμα.

- ❖ Το σημείο O αντιπροσωπεύει το σημείο έναρξης πρώτης παρέκκλισης (KOP)
- ❖ Στο σημείο B σταματάει να ορύσσεται η γεώτρηση υπό σταθερό αζιμούθιο
- ❖ Το σημείο A αποτελεί την προβολή του σημείου B στην επιφάνεια



Εικόνα 2.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχικού τμήματος με σταθερό αζιμούθιο

Στόχος είναι η αποτύπωση της οριζόντιας προβολής της τροχιάς δηλαδή της απόστασης OA.

Με δεδομένα τον ρυθμό μεταβολής της γωνίας κλίσης BUR_{OB} και το μετρούμενο βάθος MD_{OB} του τμήματος OB, υπολογίζεται αρχικά η γωνία θ που έχει διαγραφεί κατά την όρυξη του τμήματος OB :

$$\theta = \frac{(BUR_{OB} \times MD_{OB})}{100} \quad (2.31)$$

Όπου :

θ : η γωνία \widehat{OCB} (ft)

BUR_{OB} : ο ρυθμός αύξησης αζιμούθιου στο τμήμα OB (deg/100ft)

MD_{OB} : το μετρούμενο βάθος του τμήματος OB (ft)

Ως γνωστόν η περίμετρος κύκλου έχει μήκος $L = 2 \times \pi \times R$ επομένως, η ακτίνα R του κυκλικού τομέα OBC θα είναι :

$$R = OC = CB = \frac{MD_{OB} \times 360}{\theta \times 2 \times \pi} \quad (2.32)$$

Επομένως το μήκος της οριζόντιας προβολής OA (HD_{OA}) :

$$OA = OC - AC = R - AC = HD_{OA} = R - \cos\left(\theta \times \frac{\pi}{180}\right) \times R \quad (2.33)$$

Από αυτό το σημείο εύκολα μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες (Easting, Northing) της προβολής του σημείου πέρατος του τμήματος με σταθερό αζιμούθιο δηλαδή του σημείου A , με τις εξισώσεις (2.34) και (2.35).

$$Easting = \sin \omega \times OA \quad (2.34)$$

$$Northing = \cos \omega \times OA \quad (2.35)$$

Όπου:

ω : το αζιμούθιο του τμήματος που ορύχθηκε με σταθερό αζιμούθιο (deg)

OA : το μήκος της οριζόντιας προβολής του τμήματος με σταθερό αζιμούθιο (ft)

Σχεδιασμός τμήματος τροχιάς με συνεχώς μεταβαλλόμενο αζιμούθιο

Μέχρι το σημείο αυτό έχει επιλυθεί αναλυτικά το πρόβλημα σχεδιασμού του τμήματος με σταθερό αζιμούθιο. Η σύνδεση του τέλους του τμήματος με σταθερό αζιμούθιο, με τον στόχο θα γίνει από ένα τμήμα το οποίο θα έχει συνεχώς μεταβαλλόμενο αζιμούθιο. Στο μέρος 2.2.1 παρουσιάστηκε αναλυτικά ο σχεδιασμός τροχιάς με συνεχώς μεταβαλλόμενο αζιμούθιο επομένως για την επίλυση αυτού του ζητήματος ακολουθείται ο ίδιος ακριβώς τρόπος σχεδιασμού που παρουσιάστηκε στο μέρος 2.2.1. Σε αυτή την περίπτωση η τροχιά μεταβαλλόμενου αζιμούθιου θα έχει σημείο έναρξης το πέρας του τμήματος σταθερού αζιμούθιου ενώ στην προηγούμενη ενότητα το σημείο έναρξης ήταν η θέση του γεωτρήσανου (αρχή των αξόνων).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προσδιορισμός της τροχιάς κεκλιμένων γεωτρήσεων κατά την όρυξη

3.1. Εισαγωγή

Η διαδικασία εντοπισμού της θέσης του κοπτικού ανά πάσα στιγμή και κατ' επέκταση η επίγνωση της πραγματικής τροχιάς της γεώτρησης στην πράξη είναι ιδιαιτέρως σημαντική διαδικασία για τους εξής λόγους:

1. Για την επαλήθευση της σωστής τροχιάς που ακολουθεί η γεώτρηση σε σχέση με την σχεδιασθείσα.
2. Για να αποφευχθεί περίπτωση τομής της τροχιάς διαφορετικών γειτονικών γεωτρήσεων.
3. Για τον υπολογισμό της έντασης της γωνίας “dog leg” (DLS) σε τυχόν έντονες μεταβολές κλίσης ή και αζιμούθιου.
4. Για να διασφαλιστεί πως η γεώτρηση κινείται εντός των νόμιμων γεωγραφικών ορίων.
5. Για τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του πυθμένα γεωτρήσεων. Σε περίπτωση ανάφλεξης – ανατίναξης, είτε άλλων προβλημάτων που τυχόν συμβούν, υπάρχει ανάγκη όρυξης νέου πηγαδιού το οποίο θα λειτουργήσει ως γεώτρηση εκτόνωσης (relief well) όπου θα πρέπει να προσεγγίσει τον πυθμένα της προβληματικής γεώτρησης.

Η διαδικασία αυτή απαιτεί την συνεχή λήψη μετρήσεων, τα αποτελέσματα των οποίων οδηγούν στον ακριβή εντοπισμό της πραγματικής τροχιάς της γεώτρησης. Η συχνότητα λήψης μετρήσεων εξαρτάται από τις αποφάσεις που λαμβάνει η εταιρία, το τμήμα που ορύσσεται και τον τύπο των εργαλείων που θα πραγματοποιήσουν τις μετρήσεις. Οι μετρήσεις κατά κανόνα λαμβάνονται ανά τακτά διαστήματα προχώρησης (~12m, ή ανά κάθε σύνδεση διατρητικού στελέχους) κατά τη διάτρηση κρίσιμων τμημάτων, όπως για παράδειγμα το τμήμα αύξησης γωνίας κλίσης (Build up Section). Αντίθετα, κατά την όρυξη εφαπτομενικών τμημάτων μεγάλου μήκους, οι μετρήσεις μπορούν να γίνονται ανά 36m (δηλαδή κάθε τρεις συνδέσεις στελεχών). Το σχέδιο που θα καθορίσει τη συχνότητα λήψης μετρήσεων αποφασίζεται κατά τη διάρκεια καθορισμού του προγράμματος

διάτρησης. Σε περίπτωση που διαπιστωθεί πως η γεώτρηση αποκλίνει από την προκαθορισμένη πορεία της, τότε κατάλληλος εξοπλισμός (directional orientation tool) θα εισαχθεί ώστε σταδιακά να επαναφέρει την γεώτρηση. Γενικά, όσο γρηγορότερα ανιχνευθεί κάποιο πρόβλημα τόσο ευκολότερη γίνεται η επίλυσή του. Άρα, η αποτελεσματική πραγματοποίηση μετρήσεων είναι αναγκαία στις κατευθυνόμενες γεωτρήσεις (Farah, 2013).

3.2. Εξοπλισμός πραγματοποίησης μετρήσεων κατά τη διάτρηση

Ο εξοπλισμός επισκόπησης της γεώτρησης κατά τη διάτρηση μπορεί να καταγράφει τρεις κύριες παραμέτρους που είναι απαραίτητες για την εκπόνηση στη συνέχεια των υπολογισμών που έχουν ως αποτέλεσμα την σωστή απεικόνιση της τροχιάς της. Οι παράμετροι αυτοί είναι :

- ❖ η γωνία κλίσης,
- ❖ το αζιμούθιο και
- ❖ το ολικό μετρούμενο βάθος σε κάθε σημείο μέτρησης.

Τα όργανα λαμβάνουν τις μετρήσεις είτε ταυτόχρονα με τη διάτρηση, σε πραγματικό χρόνο, είτε κατόπιν της ολοκλήρωσης όρυξης ενός τμήματος.

Κάθε διαφορετικό βάθος εκπόνησης μετρήσεων αποτελεί και έναν διαφορετικό σταθμό (survey station). Το μετρούμενο βάθος κάθε σταθμού προκύπτει από το άθροισμα του μήκους των διαφόρων τμημάτων της διατρητικής στήλης (μη συμπεριλαμβανομένης της διάταξης B.H.A). Όπως και η πλειοψηφία των μεθόδων μέτρησης έτσι και οι εν λόγω μετρήσεις μπορεί να παρουσιάσουν σφάλματα που οφείλονται είτε στην υπολειτουργία του εξοπλισμού, είτε σε άλλους παράγοντες.

Για παράδειγμα, τα όργανα μέτρησης μπορεί να επηρεάζονται από το περιβάλλον της γεώτρησης δηλαδή την πίεση και την θερμοκρασία της λάσπης με αποτέλεσμα αυτά να υπολειτουργούν. Επίσης σφάλματα μπορεί να προκύψουν μέσω της διαδικασίας μετατροπής των μετρούμενων μεγεθών στα εν τέλει ζητούμενα μεγέθη (γωνία κλίσης, αζιμούθιο). Ο εξοπλισμός μέτρησης περιβάλλεται από μεταλλικά περιβλήματα που δρουν και ως αντίβαρα (drill collars) ώστε να τον προστατεύουν από τις δυσμενείς συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάτρηση. Τα τμήματα αυτά της διατρητικής στήλης τοποθετούνται

όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο κοπτικό. Ο εξοπλισμός πραγματοποίησης μετρήσεων χωρίζεται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

1. Εργαλεία μαγνητικών μετρήσεων (magnetic survey tools)
2. Εργαλεία λήψης μετρήσεων κατά τη διάτρηση (measurements while drilling MWD)
3. Γυροσκόπια

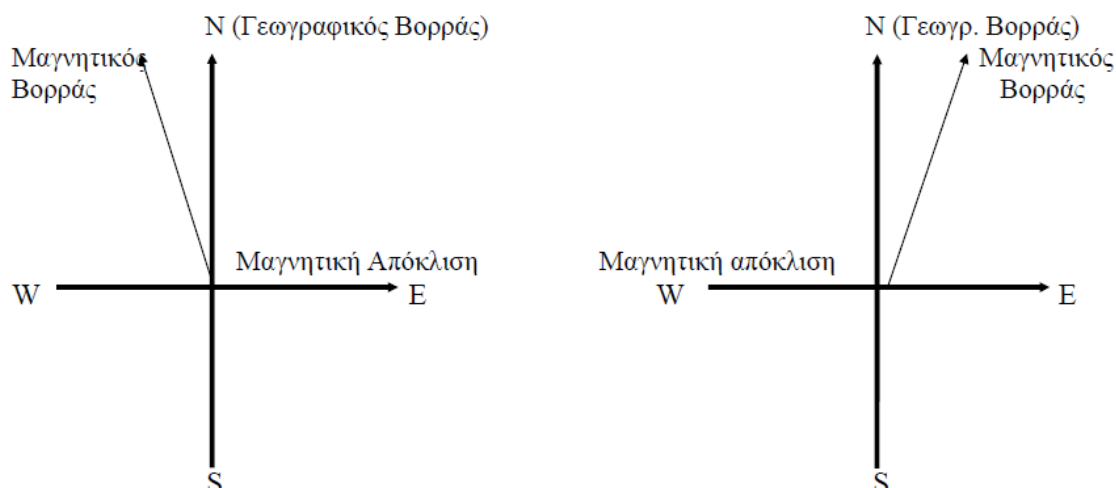
3.2.1. Εργαλεία μαγνητικών μετρήσεων

Πραγματικός και Μαγνητικός Βορράς

Ο μαγνητικός και γεωγραφικός Βορράς δεν συμπίπτουν μεταξύ τους. Ο γεωγραφικός Βόρειος και Νότιος πόλος είναι εκεί όπου οι γραμμές του γεωγραφικού μήκους (οι μεσημβρινοί) συγκλίνουν στο Βορρά. Ο μαγνητικός Βορράς βρίσκεται σε ένα σημείο στο νησί Elsmere του Καναδά. Η απόκλιση μεταξύ πραγματικού και μαγνητικού Βορρά καλείται **Μαγνητική Απόκλιση** και είναι διαφορετική για τα περισσότερα σημεία επί της επιφάνειας της Γής. Επιπλέον, η θέση του μαγνητικού Βόρειου πόλου μεταβάλλεται ετησίως (Rabia, 2002).

Έτσι, οι μετρήσεις μέσω μαγνητικής πυξίδας αλλοιώνονται εξαιτίας της δράσης του γήινου μαγνητικού πεδίου. Ακριβώς γι' αυτό τον λόγο, οι μετρήσεις της γωνίας διεύθυνσης μέσω πυξίδας έχουν ως σημείο αναφοράς τον Μαγνητικό Βορρά και όχι τον Γεωγραφικό Βορρά. Για τον ακριβή προσδιορισμό τους ως προς τον Γεωγραφικό Βορρά, απαιτείται να ληφθεί υπόψη στις μετρήσεις μέσω της μαγνητικής πυξίδας, η συμμετοχή της Μαγνητικής απόκλισης.

Ο Μαγνητικός Βορράς μπορεί να βρίσκεται προς τα ανατολικά ή δυτική του Γεωγραφικού Βορρά (Εικόνα 3.1). Στην πρώτη περίπτωση, η τιμή της Μαγνητικής Απόκλισης πρέπει να προστίθεται (+MA) στη μέτρηση μέσω της μαγνητικής πυξίδας, σύμφωνα με την ισχύουσα διεθνώς σύμβαση. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση, η τιμή της Μαγνητικής Απόκλισης πρέπει να αφαιρείται (-MA) από την μέτρηση μέσω της πυξίδας, ώστε να υπολογισθεί η γωνία διεύθυνσης ως προς τον Γεωγραφικό Βορρά (Stamatakí, και συν., 2003).



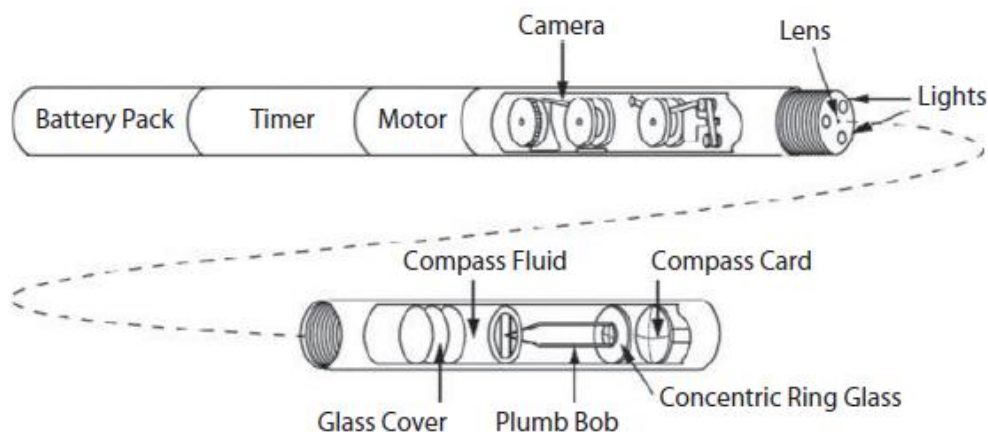
Εικόνα 3.1 : Μαγνητική απόκλιση προς τα Δυτικά (-MA) (στα αριστερά) και Μαγνητική Απόκλιση προς τα Ανατολικά (στα δεξιά)

Εξοπλισμός

Τα εργαλεία μαγνητικών μετρήσεων χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της οριζόντιας συνιστώσας του τοπικού γήινου μαγνητικού πεδίου. Μέσω αυτών των μετρήσεων προκύπτουν η γωνία κλίσης και το αζιμούθιο κάθε σημείου της τροχιάς της γεώτρησης. Η παρουσία μαγνητικών υλικών πλησίον του εξοπλισμού όπως η σωλήνωση, τα αντίβαρα (drill collars) ή ακόμα και γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν μαγνητικά στοιχεία, μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένες μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου. Για τον περιορισμό τέτοιων επιδράσεων προτιμώνται τα μη μαγνητικά αντίβαρα κατασκευασμένα από κράμα χαλκού-νικελίου.

Οι συγκεκριμένες μετρήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο διάτρησης. Τα όργανα βυθίζονται μέσα στο πηγάδι από την επιφάνεια ή προωθούνται μέσω της διατρητικής στήλης με αντλίες ή με τη βοήθεια συρματόσχοινου. Υπάρχουν όργανα μαγνητικών μετρήσεων μονής και πολλαπλής διασκόπισης (Magnetic single shot surveys και Magnetic multiple shot surveys).

Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται ένα μαγνητικό όργανο πολλαπλής διασκόπισης που αποτελείται από μία μονάδα που διαθέτει πυξίδα και όργανο μέτρησης της γωνίας κλίσης, μία κάμερα που περιέχει φωτογραφικό φιλμ μεγάλου μήκους για την αποτύπωση πολλαπλών μετρήσεων, ένα χρονόμετρο και μία πηγή ενέργειας.



Εικόνα 3.2 : Μαγνητικό όργανο καταγραφής πολλαπλών μετρήσεων (Drilling Engineering, Institute of Petroleum Engineering, Heriot –Watt University)

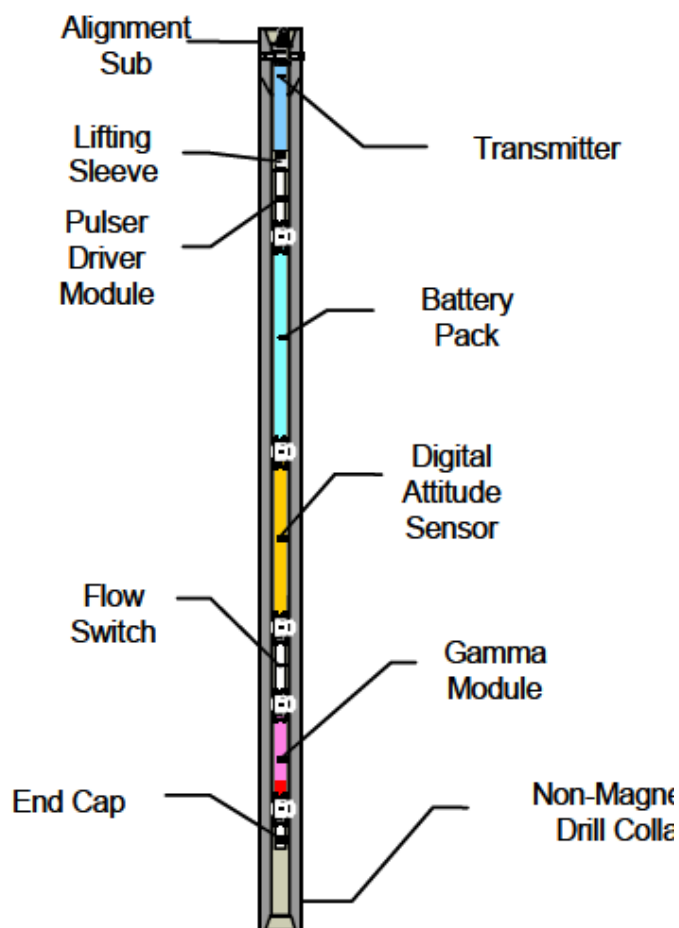
3.2.2. Μετρήσεις κατά τη διάτρηση (Measurements While Drilling)

Το σύστημα λήψης μετρήσεων συγχρόνως με την διαδικασία διάτρησης (MWD), αναπτύχθηκε με σκοπό να συλλέγει και να αξιολογεί διάφορες παραμέτρους στον πυθμένα της γεώτρησης και να τις μεταδίδει στην επιφάνεια χωρίς να διακόπτεται η προχώρηση στο πηγάδι. Τέτοιος εξοπλισμός χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά κατά τις αρχές της δεκαετίας του 70'. Μέχρι τότε ο μόνος τρόπος για την συλλογή δεδομένων ήταν η διακοπή της διάτρησης για την «ενσύρματη» λήψη μετρήσεων (που γινόταν με την καταβύθιση του εξοπλισμού στην γεώτρηση με συρματόσχοινο). Ως αποτέλεσμα ο μη παραγωγικός χρόνος αυξανόταν με τη συνεχή διακοπή της διαδικασίας προχώρησης. Με το σύστημα MWD οι μετρήσεις παρέχονται σε πραγματικό χρόνο δίνοντας τη δυνατότητα στον μηχανικό να κάνει επιτόπιες παρεμβάσεις στην πορεία της γεώτρησης. Η μετάδοση των δεδομένων στην επιφάνεια γίνεται μέσω της λάσπης στο εσωτερικό της διατρητικής στήλης. Έτσι η διάτρηση θα διακοπεί για λίγα μόνο λεπτά ώστε να ληφθούν τα δεδομένα που στέλνει το όργανο στην επιφάνεια με τη μορφή παλμών. Μετέπειτα εισήχθησαν περισσότερες μέθοδοι εκπομπής δεδομένων όπως η ηλεκτρομαγνητική και η ακουστική. Αρχικά, τα συστήματα MWD μετρούσαν μόνο γωνία κλίσης, αζιμούθιο και γωνία προσανατολισμού (tool face). Η ενσωμάτωση αισθητήρων ακτινοβολίας «γάμμα» έδωσε τη δυνατότητα μέτρησης της ραδιενέργειας και ανίχνευσης σχιστολιθικών δομών. Επίσης, τα συστήματα MWD εξοπλίζονται με παραμορφωσιόμετρα και μετρητές πίεσης του ρευστού (στον χώρο μεταξύ της διατρητικής στήλης και του τοιχώματος της γεώτρησης-δακτύλιο) ώστε να προσδιορίζονται η ισοδύναμη πυκνότητα λάσπης ECD (equivalent circulating density), η οποία είναι σημαντική παράμετρος για την αποφυγή εισροών αλλά και κατακρημνίσεων

ιδιαίτερος για τις γεωτρήσεις όπου η πίεση των πόρων των περιβαλλόντων σχηματισμών προσεγγίζει την οριακή πίεση θραυσμού του σχηματισμού. Άλλες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του κοπτικού που μπορεί να παρέχει ο εξοπλισμός MWD είναι:

- ❖ Η ταχύτητα περιστροφής της διατρητικής στήλης
- ❖ Ο τύπος και η ένταση των δονήσεων
- ❖ Η ροπή στρέψης και το βάρος επί του κοπτικού
- ❖ Η ροή της λάσπης
- ❖ Η θερμοκρασία στον πυθμένα του πηγαδιού

Στην Εικόνα 3.3 φαίνονται τα βασικά στοιχεία που αποτελούν τον εξοπλισμό MWD, δηλαδή το κανάλι τηλεμετρίας, το σύστημα μετάδοσης σήματος, η πηγή ενέργειας και οι αισθητήρες (Hossain, και συν., 2015).



Εικόνα 3.3 Εξοπλισμός πραγματοποίησης μετρήσεων κατά την διάτρηση (Rabia, 2002)

3.2.3. Γυροσκόπια

Οι γυροσκοπικές πυξίδες χρησιμοποιούνται κυρίως όταν οι μαγνητικές μέθοδοι μετρήσεων δε μπορούν να εφαρμοστούν λόγω παρεμβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από σωληνώσεις που βρίσκονται πλησίον ή περικυκλώνουν τον σταθμό λήψης μετρήσεων.

Υπάρχουν τρία βασικά είδη γυροσκοπίων:

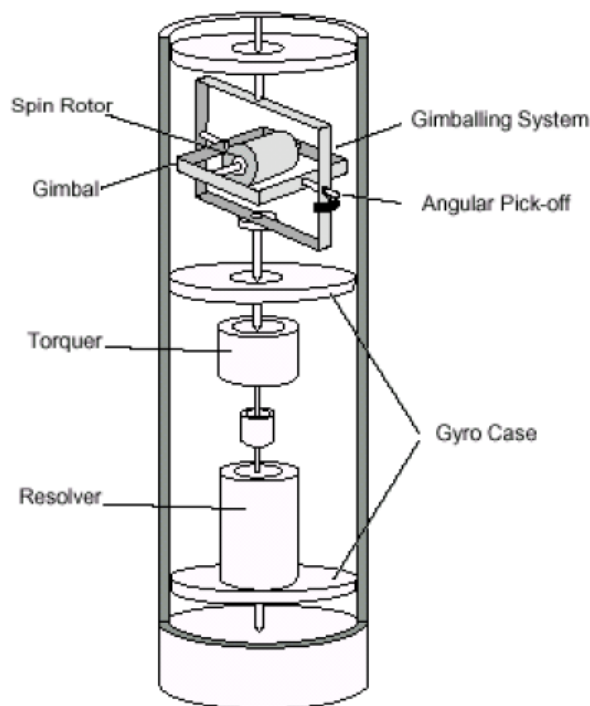
1. Τα συμβατικά γυροσκόπια
2. Τα γυροσκόπια ανίχνευσης Βορρά (North Seeking Gyros NSG)
3. Τα γυροσκόπια δακτυλιδιών λείζερ (Rate initial Gyro System)

Το συμβατικό γυροσκόπιο χρησιμοποιείται για την μέτρηση μεταβολών του αζιμούθιου σε σχέση με μία προκαθορισμένη τιμή αναφοράς (reference direction). Αν υπάρχει σφάλμα στην προκαθορισμένη τιμή, το λάθος αυτό θα οδηγήσει μία σειρά λανθασμένων μετρήσεων, για αυτό το λόγο είναι σημαντικό να καθορίζεται σωστά και με ακρίβεια η συγκεκριμένη παράμετρος. Σε αντίθεση με τα όργανα μαγνητικών μετρήσεων, τα γυροσκόπια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με χαλύβδινες σωληνώσεις και αντίβαρα καθώς δεν επηρεάζονται από μαγνητικά υλικά.

Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν ένα συμβατικό γυροσκόπιο παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4. Πρόκειται για ένα ταχύτατα περιστρεφόμενο στροφέα (ρότορας) ο οποίος εδράζεται πάνω σε πλαίσιο και ρυθμιστές ισορροπίας (gimbals). Οι ρυθμιστές ισορροπίας είναι μηχανισμοί που αποτελούνται από περιστρεφόμενους δακτυλίους τοποθετημένους σε κατάλληλες γωνίες. Χρησιμοποιούνται προκειμένου να ισορροπήσουν όργανα όπως πυξίδες και χρονόμετρα που βρίσκονται πάνω σε κινούμενα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμούς.

Τα γυροσκόπια τύπου NSG χρησιμοποιούν προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα για την μέτρηση του ρυθμού περιστροφής της Γής και στη συνέχεια τον προσδιορισμό του προσανατολισμού του γεωγραφικού Βορρά. Τα όργανα αυτά είναι σχεδιασμένα να ανιχνεύουν και να μετρούν την οριζόντια συνιστώσα της στροφορμής (spin vector-διάνυσμα στροφορμής) της Γής. Τα γυροσκόπια NSG δεν χρησιμοποιούνται για γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα των 70° καθώς και για γωνίες παρέκκλισης μεγαλύτερες των 65-70°. Είναι ευαίσθητα στην κίνηση και προσεγγίζουν την γεώτρηση μέσω καλωδίου

(δεν μπορούν να αποτελέσουν μέρος του εξοπλισμού που πραγματοποιεί μετρήσεις κατά τη διάρκεια της διάτρησης).



Εικόνα 3.4 Συμβατικό γυροσκόπιο (Rabia, 2002)

To Rate Initial Gyro System χρησιμοποιεί γυροσκόπια τύπου λέιζερ που λειτουργούν σε τρεις διαστάσεις για την εύρεση του γεωγραφικού Βορρά. Επιπροσθέτως, ειδικά επιταχυνσιόμετρα επιτρέπουν τη μέτρηση της επιτάχυνσης στις τρεις διαστάσεις. Πρόκειται για εξοπλισμό μακράν ακριβότερο των συμβατικών γυροσκοπίων και των γυροσκοπίων NSG. (Rabia, 2002)

3.3. Μέθοδοι προσδιορισμού τροχιάς

Μετά την πραγματοποίηση μετρήσεων, κάθε σταθμός (i) θα χαρακτηρίζεται από έναν συνδυασμό τριών αριθμών:

- ❖ το αζιμούθιο (A_i),
- ❖ τη γωνία κλίσης (I_i)
- ❖ το μετρούμενο βάθος (MD_i)

Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θέσης κάθε σταθμού στον χώρο, μέσω των μεταβολών των συντεταγμένων Βορρά-νότου ($\Delta\text{Northing}$), ανατολής δύσης ($\Delta\text{Easting}$), της μεταβολής του πραγματικού κατακόρυφου βάθους (ΔTVD) καθώς και της μεταβολής της έντασης της γωνίας “dog leg” (Dog Leg Severity , ΔDLS). Το σύνολο των συντεταγμένων κάθε σταθμού καθορίζει και την τροχιά της γεώτρησης.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού των συντεταγμένων κάθε σταθμού οι βασικότερες εκ των οποίων είναι:

1. Εφαπτομενική μέθοδος (tangential)
2. Εξισορροπημένη Εφαπτομενική μέθοδος ($\text{balanced tangential}$)
3. Μέθοδος μέσου όρου (angle averaging)
4. Μέθοδος ακτίνας καμπυλότητας ($\text{radius of curvature}$)
5. Μέθοδος ελάχιστης καμπυλότητας (minimum curvature)

Πρακτικά, για κάθε σημείο στο χώρο οι συντεταγμένες (x,y,z) ορίζονται ως προς ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς. Στην περίπτωσή μας το τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων είναι αυτό που διέρχεται από το σημείο έναρξης της γεώτρησης στην επιφάνεια ή το σημείο πρώτης παρέκκλισης (kop) και για το οποίο ισχύει:

- ❖ Ο θετικός ημιάξονας των x , να ταυτίζεται με τον άξονα μαγνητικής πυξίδας που καθορίζει την Ανατολή, ενώ ο αρνητικός με τη Δύση.
- ❖ Ο θετικός ημιάξονας των y , να ταυτίζεται με τον άξονα που καθορίζει τον μαγνητικό Βορρά, ενώ ο αρνητικός τον μαγνητικό Νότο.
- ❖ Ο διευθυνόμενος προς τα κάτω ημιάξονας z , ορίζεται άξονας του πραγματικού κατακόρυφου βάθους. Με βάση τον ορισμό του συστήματος αξόνων, για κάθε σημείο, οι συντεταγμένες (x,y,z) είναι αντίστοιχα οι τιμές (Easting , Northing , TVD -πραγματικό κατακόρυφο βάθος).

Οι μέθοδοι προσδιορισμού της τροχιάς που ακολουθούν είναι εκείνες που έχουν μεγαλύτερη εφαρμογή στην πράξη. Κάθε μία προσεγγίζει το σχήμα της τροχιάς με διαφορετικό τρόπο (απλό ή σύνθετο) και επομένως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων διαφοροποιείται (Stamatakí, και συν., 2003).

3.3.1. Εφαπτομενική μέθοδος

Αποτελεί την απλούστερη απ τις μεθόδους. Οι εξισώσεις χρησιμοποιούν την γωνία κλίσης (I_{i+1}) και το αζιμούθιο (A_{i+1}) στον σταθμό που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος κάθε φορά

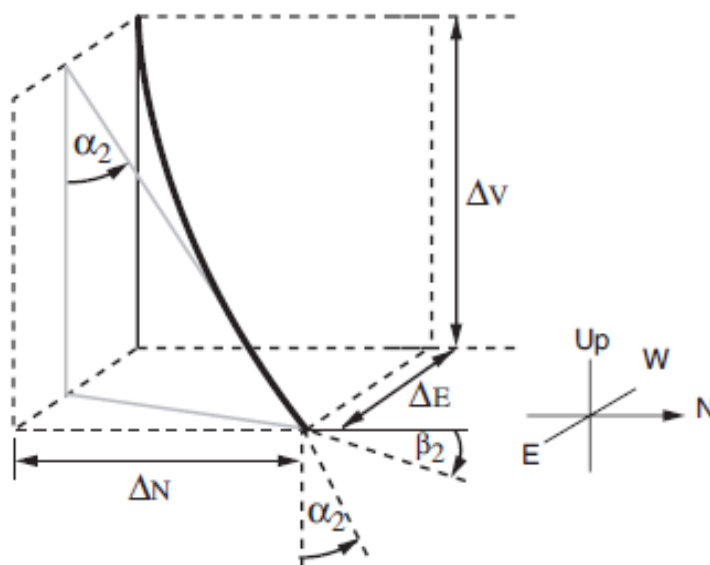
καθώς και την μεταβολή του ολικού μετρούμενου βάθους (ΔMD). Στην Εικόνα 3.5 φαίνεται η τροχιά όπως υπολογίζεται με την εφαπτομενική μέθοδο (γκρί) σε σχέση με την πραγματική (μαύρη). Όσο μεγαλύτερες οι γωνίες και η απόσταση μεταξύ των σταθμών, τόσο πιο ανακριβή αποτελέσματα πρόκειται να προκύψουν. Αυτός είναι και ο λόγος που δε συστήνεται αυτή η μέθοδος.

Τα ζητούμενα μεγέθη (ΔTVD , $\Delta Northing$, $\Delta Easting$) υπολογίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων :

$$\Delta TVD = \Delta MD \times \cos I_2 \quad (3.1)$$

$$\Delta Northing = \Delta MD \times \sin I_2 \times \cos A_2 \quad (3.2)$$

$$\Delta Easting = \Delta MD \times \sin I_2 \times \sin A_2 \quad (3.3)$$

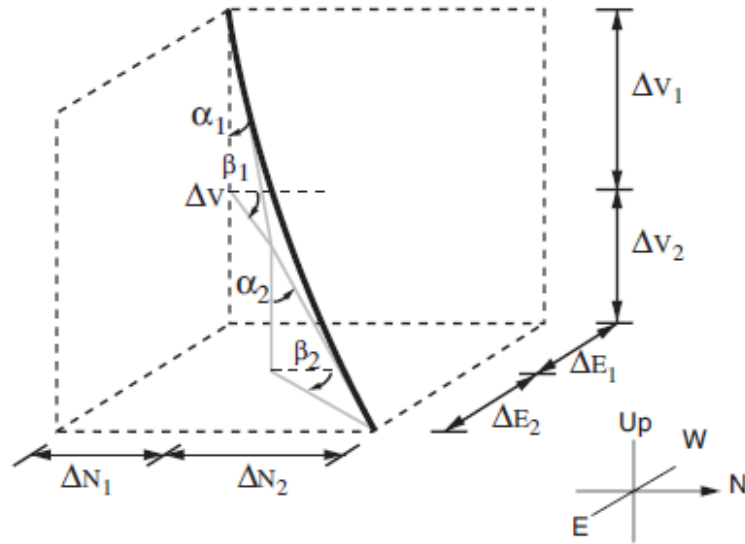


Εικόνα 3.5 Απεικόνιση τροχιάς με την εφαπτομενική μέθοδο

3.3.2. Εξισορροπημένη εφαπτομενική μέθοδος

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και στους δύο σταθμούς και θεωρεί την τροχιά ως δύο ευθύγραμμα τμήματα, ίσου μήκους, εκφρασμένων ως μεταβολή του ολικού μετρούμενου βάθους (ΔMD) (Εικόνα 3.6). Το αζιμούθιο και η κλίση κάθε τμήματος υπολογίζονται από τα δεδομένα του αντίστοιχου σταθμού (I_1, I_2 και A_1, A_2), έτσι η μέθοδος θα εφαρμοστεί δύο φορές (μία για κάθε τμήμα)

(Ford, 2017). Ως αποτέλεσμα, προσεγγίζεται καλύτερα η πραγματική τροχιά και παρέχονται ακριβέστερα αποτελέσματα.



Εικόνα 3.6 Απεικόνιση τροχιάς με την εξισορροπημένη εφαπτομενική μέθοδο.

Τα ζητούμενα μεγέθη (ΔTVD , $\Delta Northing$, $\Delta Easting$) υπολογίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων :

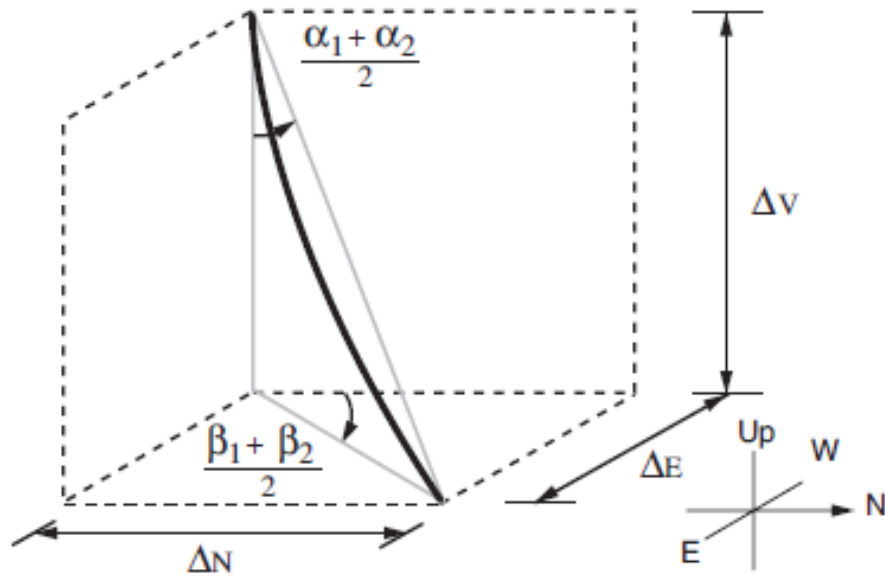
$$\Delta TVD = \frac{\Delta MD}{2} \times (\cos I_1 + \cos I_2) \quad (3.4)$$

$$\Delta Northing = \frac{\Delta MD}{2} \times (\sin I_1 \times \cos A_1 + \sin I_2 \times \cos A_2) \quad (3.5)$$

$$\Delta Easting = \frac{\Delta MD}{2} \times (\sin I_1 \times \sin A_1 + \sin I_2 \times \sin A_2) \quad (3.6)$$

3.3.3. Μέθοδος του μέσου όρου

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί το μέσο όρο των γωνιών κλίσης και αζιμούθιου των δύο σταθμών. Η πορεία της γεώτρησης από σταθμό σε σταθμό παριστάνεται από ένα ευθύγραμμο τμήμα (Εικόνα 3.7). Όταν οι μετρήσεις εκτελούνται σε πολύ κοντινά μεταξύ τους σημεία-σταθμούς και ο ρυθμός αύξησης της καμπυλότητας είναι μικρός τότε η μέθοδος μπορεί να δίνει σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συνήθως χρησιμοποιείται στο πεδίο καθώς οι υπολογισμοί είναι απλοί.



Εικόνα 3.7 Απεικόνιση τροχιάς με την μέθοδο του μέσου όρου.

Τα ζητούμενα μεγέθη (ΔTVD , $\Delta Northing$, $\Delta Easting$) υπολογίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων :

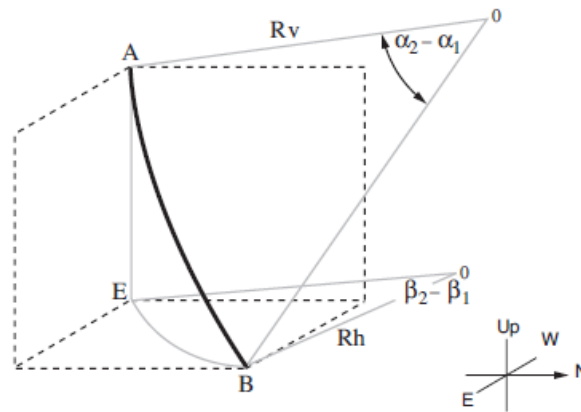
$$\Delta TVD = \Delta MD \times \cos \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (3.7)$$

$$\Delta Northing = \Delta MD \times \sin \frac{I_1 + I_2}{2} \times \cos \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (3.8)$$

$$\Delta Easting = \Delta MD \times \sin \frac{I_1 + I_2}{2} \times \sin \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (3.9)$$

3.3.4. Μέθοδος ακτίνας καμπυλότητας

Η μέθοδος αυτή απεικονίζει το μεταξύ δύο συνεχόμενων σταθμών τμήμα υπό την μορφή ενός καμπυλόγραμμου τμήματος που μοιάζει με σφαιρικό τομέα ή κυκλικό τόξο και ενώνει τους δύο σταθμούς (Εικόνα 3.8). Ιδανικά, η γωνία κλίσης (I) και το αζιμούθιο μεταβάλλονται γραμμικά κατά μήκος της τροχιάς. Το μοντέλο είναι λιγότερο επιρρεπές σε λάθη, ακόμα και σε περίπτωση απομακρυσμένων σταθμών. Οι υπολογισμοί όμως είναι περίπλοκοι και η πραγματοποίησή τους χρήζει τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Εικόνα 3.8 Απεικόνιση τροχιάς με την μέθοδο ακτίνας καμπυλότητας.

Τα ζητούμενα μεγέθη (ΔTVD , $\Delta Northing$, $\Delta Easting$) υπολογίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων :

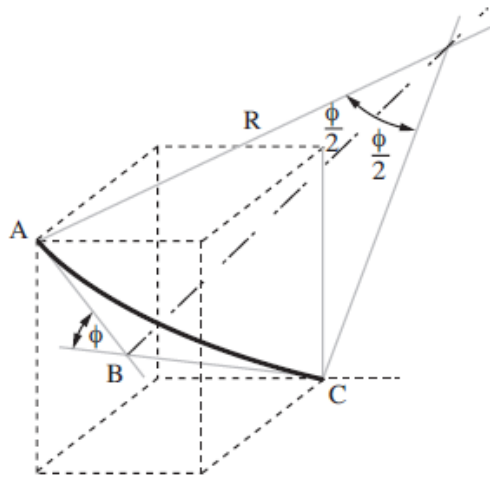
$$\Delta TVD = \frac{180 \times \Delta MD \times (\sin I_2 - \sin I_1)}{\pi \times (I_2 - I_1)} \quad (3.10)$$

$$\Delta TNorthing = \frac{180^2 \times \Delta MD \times (\cos I_2 - \cos I_1) \times (\sin A_1 - \sin A_2)}{\pi^2 \times (I_2 - I_1) \times (A_2 - A_1)} \quad (3.11)$$

$$\Delta Easting = \frac{180^2 \times \Delta MD \times (\cos I_1 - \cos I_2) \times (\cos A_1 - \cos A_2)}{\pi^2 \times (I_2 - I_1) \times (A_2 - A_1)} \quad (3.12)$$

3.3.5. Μέθοδος ελάχιστης καμπυλότητας

Η μέθοδος της ελάχιστης καμπυλότητας είναι παρόμοια της μεθόδου της ακτίνας καμπυλότητας, επομένως η τροχιά αναπαριστάται από καμπυλόγραμμο τμήμα μεταξύ των δύο σταθμών. Επίσης, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι ανάλογες των σχέσεων της μεθόδου εξισοροπημένης εφαπτομενική μεθόδου πολλαπλασιασμένες με ένα παράγοντα (Ratio Factor, RF) που εξαρτάται από την καμπυλότητα της τροχιάς. Το μοντέλο ελάχιστης καμπυλότητας είναι πιο ακριβές από τα υπόλοιπα (όπως θα αποδειχθεί και παρακάτω) όμως απαιτεί περίπλοκους υπολογισμούς όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (3.13), (3.14) και (3.15). Οι Biltayib, και συν., 2015, αποδεικνύουν πως η μέθοδος της ελάχιστης καμπυλότητας είναι η πιο ακριβής, καθώς επίσης και ότι παρουσιάζει και τα μικρότερα σφάλματα για τον υπολογισμό της τροχιάς μιας γεώτρησης.



Εικόνα 3.9 Απεικόνιση τροχιάς με την μέθοδο ελάχιστης καμπυλότητας.

$$\Delta TVD = \frac{\Delta MD}{2} \times (\cos I_1 + \cos I_2) \times RF \quad (3.13)$$

$$\Delta Northing = \frac{\Delta MD}{2} \times (\sin I_1 \times \cos A_1 + \sin I_2 \times \cos A_2) \times RF \quad (3.14)$$

$$\Delta Easting = \frac{\Delta MD}{2} \times (\sin I_1 \times \sin A_1 + \sin I_2 \times \sin A_2) \times RF \quad (3.15)$$

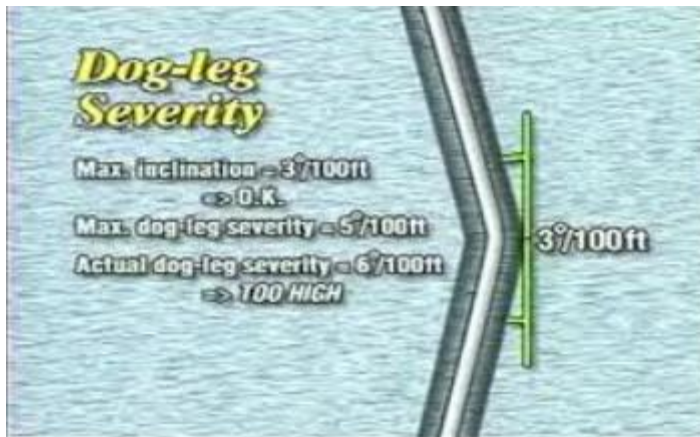
Όπου RF :

$$RF = \frac{2}{\beta} \times \tan \frac{\beta}{2} \quad (3.16)$$

$$\cos \beta = \cos(I_2 - I_1) - (\sin I_1 \times \sin I_2 \times (1 - \cos(A_2 - A_1))) \quad (3.17)$$

3.3.6. Ένταση γωνίας Dog Leg (DLS)

Αποτελεί μία παράμετρο που πάντα οι τιμές της υπολογίζονται και παρακολουθούνται εντατικά. Συνίσταται στην συνολική μεταβολή του προσανατολισμού της γεώτρησης στις τρεις διαστάσεις. Συνήθως η εταιρία που αναλαμβάνει το έργο θέτει περιορισμούς όσον αφορά το μέτρο της κάμψης (ανάλογη με την κάμψη του πίσω ποδιού ενός σκύλου) μεταξύ δύο σταθμών, για παράδειγμα 5 μοίρες ανά 100 πόδια. Ένας τέτοιος περιορισμός εξασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία του διατρητικού εξοπλισμού (χωρίς να δημιουργούνται μέρη στα οποία η διατρητική στήλη μπορεί να ενσφηνώσει, κολλήσει κλπ)(Ford, 2017).



Εικόνα 3.10 Γωνία Dog Leg

Η ένταση της γωνίας Dog Leg δίνεται από την σχέση:

$$DLS = \cos^{-1}(I_2 - I_1) - (\sin I_1 \times \sin I_2) \times (1 - \cos(A_2 - A_1)) \times \frac{100}{\Delta MD} \quad (3.18)$$

\

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάπτυξη προγράμματος σχεδιασμού κεκλιμένων γεωτρήσεων τύπου **Build & Hold**

4.1. Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα (λογισμικό) για το σχεδιασμό της τροχιάς κατευθυνόμενων γεωτρήσεων τύπου Build & Hold. Αποτελεί ένα ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα που ο καθένας μπορεί να χρησιμοποιεί, να αντιγράψει, να διανέμει και να τροποποιεί ανάλογα με τις ανάγκες του. Η ανάπτυξη του προγράμματος έγινε στην πλατφόρμα Visual Studio 2017 της Microsoft και με γλώσσα προγραμματισμού την Visual Basic. Οι 3000 γραμμές κώδικα περιέχουν μια σειρά από μεθοδολογίες, όπως για παράδειγμα ο τρόπος εισαγωγής και εξαγωγής πληροφορίας μέσω excel, η μεθοδολογία εκπόνησης υπολογισμών μέσω των τιμών ενός πίνακα και πολλές άλλες, που μπορούν να διευκολύνουν την εργασία προγραμματιστών ή ερευνητών που θέλουν να χρησιμοποιήσουν το προγραμματιστικό περιβάλλον της Visual Studio. Ουσιαστικά, η παρούσα διπλωματική μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως βιβλιοθήκη εντολών έτοιμου κώδικα για την Visual Basic.

Όσον αφορά τις κατευθυνόμενες γεωτρήσεις, το πρόγραμμα είχε τέσσερις βασικούς σκοπούς:

1. Το δισδιάστατο σχεδιασμό και την αποτύπωση της τροχιάς γεωτρήσεων τύπου Build & Hold στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο καθώς και τον υπολογισμό σημαντικών γεωμετρικών παραμέτρων αυτής, όπως έχει αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 2 μέρος 2.1.
2. Την αξιοποίηση του σχεδιασμού της οριζόντιας προβολής της τροχιάς για την αξιολόγηση εναλλακτικών διαδρομών (paths) με μεταβαλλόμενο αζιμούθιο για την προσέγγιση ενός οριοθετημένου στόχου όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3 μέρος 3.3. Η ίδια μεθοδολογία βρίσκει εφαρμογή στον έλεγχο της τροχιάς μιας ορυσσόμενης στην πράξη γεώτρησης σχετικά με την ικανοποίηση των γωνιακών συνθηκών υπό τις οποίες επιβάλλεται η είσοδος της γεώτρησης εντός του στόχου και το βαθμό απόκλισης της από τα τεθέντα χωρικά όριά του.

3. Τον προσδιορισμό της πραγματικής τροχιάς γεωτρήσεων Build & Hold κατά τη φάση της διάτρησης με βάση δεδομένα μετρήσεων σε σημεία (σταθμούς), τον έλεγχο της ορυσσόμενης γεώτρησης σε σχέση με την σχεδιασθείσα και την έγκαιρη ρύθμιση της ορυσσόμενης γεώτρησης με στόχο την άμβλυση τεχνικών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν στην πράξη, όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3 μέρος 3.3.

Η ανάπτυξη του κώδικα βασίστηκε στη θεωρητική ανάλυση του σχεδιασμού όπως αυτή έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Η μέθοδος της ελάχιστης καμπυλότητας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πραγματικής τροχιάς κατά τη διάτρηση δεδομένης της μεγαλύτερης ακρίβειάς της.

Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ότι αναπτύχθηκε και παρέχεται στους χρήστες ένα υπολογιστικό «εργαλείο» το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στη φάση του σχεδιασμού μιας γεώτρησης, όσο και στη φάση όρυξής της, επιτόπου στο εργοτάξιο.

Είναι πολύ σημαντικός ο συνδυασμός αυτός γιατί δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να επανεξετάζει την σχεδιασθείσα τροχιά σε σχέση με την πραγματική και να προβαίνει σε διορθώσεις που μπορούν να γίνουν σε άμεσο χρόνο. Έτσι αποφεύγεται η δημιουργία μεγάλης έντασης προβλημάτων (αποκλίσεις από την επιθυμητή κλίση και διεύθυνση) που δεν είναι εύκολη η επαναφορά της τροχιάς στην προκαθορισμένη πορεία, ώστε να προσεγγιστεί ο στόχος με ακρίβεια ως προς το αζιμούθιο, την γωνία κλίσης και την θέση του.

4.2. Σχεδιασμός κατακόρυφης προβολής της τροχιάς Build & Hold με τη χρήση του λογισμικού

Ο στόχος σε αυτήν την περίπτωση είναι αρχικά ο υπολογισμός των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού, χρήσιμες για τον μηχανικό του έργου, καθώς και η απεικόνιση της τροχιάς της γεώτρησης σε δύο διαστάσεις. Τα μεγέθη που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και υπολογίζονται είναι τα εξής:

- ❖ Η ακτίνα του καμπυλόγραμμου τμήματος (R)
- ❖ Το κατακόρυφο βάθος (TVD), η οριζόντια απόσταση (HD) και το ολικό μετρούμενο βάθος (MD) σε οποιοδήποτε σημείο της τροχιάς

- ❖ Ο ρυθμός αύξησης γωνίας κλίσης (BUR), η μέγιστη γωνία κλίσης (θ) και το βάθος του σημείου πρώτης παρέκκλισης «kick off» (KOP). Κάθε ένα από τα μεγέθη αυτά υπολογίζεται δεδομένων των δύο άλλων εξ αυτών.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δόθηκε έμφαση στον δισδιάστατο σχεδιασμό μια κεκλιμένης γεώτρησης τύπου Build & Hold.

Εύρεση της σχετικής θέσης του στόχου ως προς το γεωτρύπανο

Ο γεωμετρικός σχεδιασμός της τροχιάς μιας γεώτρησης (κάθε τύπου) απαιτεί ως δεδομένα συγκριμένες παραμέτρους όπως:

- ❖ οι συντεταγμένες της θέσης του γεωτρύπανου (Y Well, X Well)
- ❖ οι συντεταγμένες της θέσης του σχηματισμού στόχου (Y Target, X Target).¹

Έτσι γίνεται γνωστή η θέση του στόχου σε σχέση με τη θέση του γεωτρύπανου και κατ' επέκταση είναι γνωστή η οριζόντια μετατόπιση του στόχου. Οι συντεταγμένες αυτές χρησιμοποιούνται αρχικά για τον υπολογισμό των συντεταγμένων Northing (Βορρά-Νότου) (4.1) και Easting (Ανατολής-Δύσης) (4.2), του Azimuth (αζιμούθιου) (4.3) και της οριζόντιας μετατόπισης του στόχου (HD) (4.4), όπως:

$$\text{Northing} = Y \text{ Target} - Y \text{ Well} \quad (4.1)$$

$$\text{Easting} = X \text{ Target} - X \text{ Well} \quad (4.2)$$

$$\text{Azimuth} = \tan^{-1} \frac{\text{Easting}}{\text{Northing}} \quad (4.3)$$

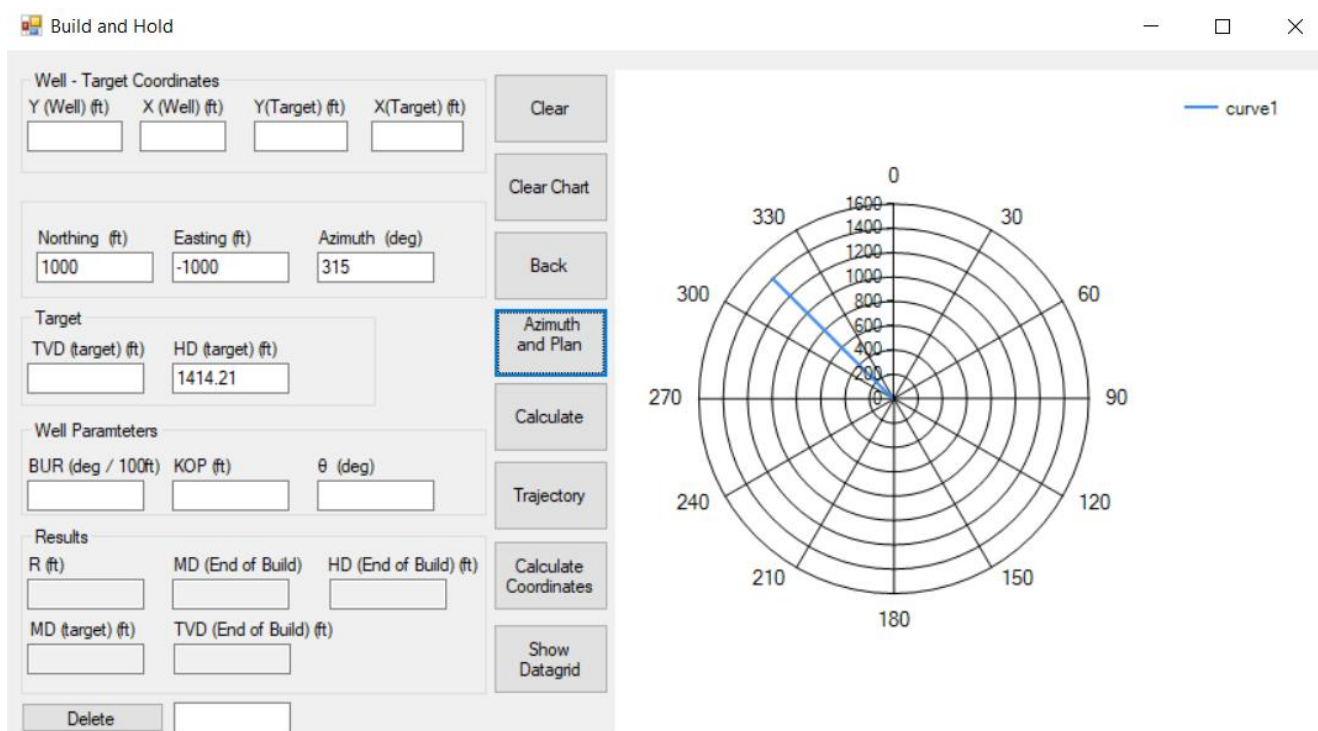
$$\text{HD} = \sqrt{\text{Easting}^2 + \text{Northing}^2} \quad (4.4)$$

Πρέπει να σημειωθεί πως η εισαγωγή των συντεταγμένων της θέσης του γεωτρύπανου και του στόχου δεν είναι υποχρεωτική, σε περίπτωση που είναι γνωστές οι συντεταγμένες Northing και Easting ή το αζιμούθιο του στόχου. Δίνεται η ευχέρεια στον χρήστη να συμπληρώσει δύο εκ των παραμέτρων Northing, Easting ή Azimuth και να υπολογιστεί από το πρόγραμμα η τρίτη άγνωστη παράμετρος καθώς και η ολική οριζόντια μετατόπιση του στόχου. Επίσης σε περίπτωση που είναι γνωστή η οριζόντια μετατόπιση του στόχου, η

¹ Όπου Y εισάγεται το γεωγραφικό πλάτος και όπου X το γεωγραφικό μήκος αντίστοιχα.

συμπλήρωση των πεδίων εισαγωγής συντεταγμένων και αζιμούθιου του στόχου είναι προαιρετική.

Βασικό αρχικό στοιχείο αποτελεί ο προσδιορισμός της σχετικής θέσης του στόχου ως προς αυτήν του γεωτρύπανου. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η φόρμα δεδομένων εισαγωγής, αποτελεσμάτων και γραφικής αποτύπωσης αυτών για τον υπολογισμό του αζιμούθιου και της οριζόντιας μετατόπισης του στόχου με δεδομένα, τις συντεταγμένες Northing και Easting του στόχου ως προς το γεωτρύπανο.



Εικόνα 4.1 : Παράδειγμα υπολογισμού αζιμούθιου, οριζόντιας μετατόπισης και απεικόνιση οριζόντιας προβολής του στόχου

Σχεδιασμός της τροχιάς στο κατακόρυφο επίπεδο

Για τον σχεδιασμό της τροχιάς στο κατακόρυφο επίπεδο, τα βασικά δεδομένα εισαγωγής είναι:

- ❖ το κατακόρυφο βάθος (TVD) του στόχου από την εξέδρα του γεωτρύπανου
- ❖ ο ρυθμός αύξησης γωνίας κλίσης του καμπυλόγραμμου τμήματος BUR
- ❖ η γωνία μέγιστης κλίσης με την οποία διαγράφεται το καμπυλόγραμμο τμήμα (θ)
- ❖ το σημείο πρώτης παρέκκλισης «Kick off Point»

Για την επίτευξη των στόχων του προγράμματος παρέχεται η δυνατότητα στους χρήστες να συμπληρώνουν με επιθυμητές τιμές τις δύο από τις τρεις αυτές παραμέτρους (KOP, BUR, θ) και αυτομάτως να υπολογίζεται η άλλη. Αυτή η δυνατότητα αποτελεί και ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του λογισμικού καθώς ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τις παραμέτρους που επιθυμεί και ταυτόχρονα να παρακολουθεί την διακύμανση της άλλης. Έτσι διευκολύνεται η εύρεση της επιθυμητής τροχιάς και γίνεται ευκολότερα κατανοητή η αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών αυτών παραμέτρων.

4.2.1. Εφαρμογή 1

Περίπτωση 1

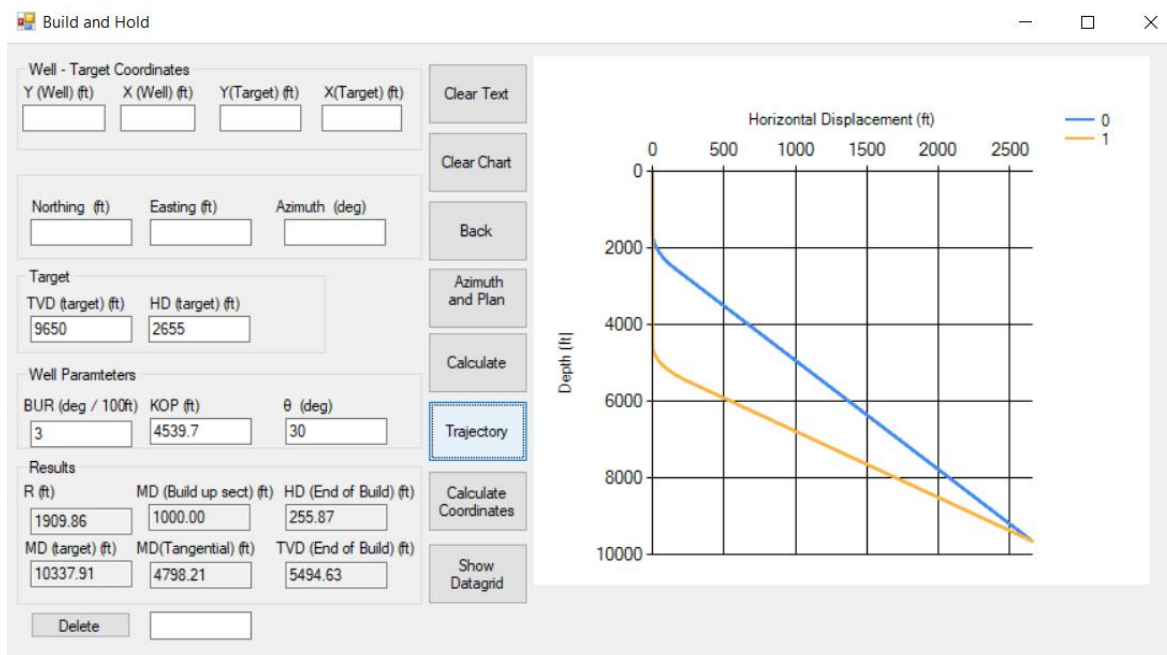
Στην Εικόνα 4.2, καμπύλη (0) (μπλε), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχεδιασμού της τροχιάς μιας κεκλιμένης γεώτρησης με τα ακόλουθα αρχικά δεδομένα:

- ❖ Στόχος σε κατακόρυφο βάθος, $TVD_{target} = 9650ft$,
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση στόχου από την κατακόρυφο, πρακτικά η μετατόπιση του στόχου από τη θέση του γεωτρώπανου, $HD_{target} = 2655ft$
- ❖ Ρυθμός μεταβολής-αύξησης γωνίας κλίσης, $BUR = 2 (deg/100ft)$
- ❖ Βάθος πρώτης παρέκκλισης KOP = 1600ft

Ζητούμενα – Αποτελέσματα όπως υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού :

- ❖ Ακτίνα καμπυλότητας του καμπυλόγραμμου τμήματος, $R = 2864.8 ft$
- ❖ Μέγιστη γωνία θ , που θα πρέπει να διαγράψει το καμπυλόγραμμο τμήμα, $\theta = 19.3 deg$
- ❖ Μήκος του καμπυλόγραμμου τμήματος, $MD_{Build\ up\ Sect} = 967 ft$.
- ❖ Κατακόρυφο βάθος του σημείου που τελειώνει το καμπυλόγραμμο τμήμα, $TVD_{End\ of\ Build} = 2546.85 ft$
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση του σημείου που τελειώνει το καμπυλόγραμμο τμήμα, $HD_{End\ of\ Build} = 161 ft$
- ❖ Μήκος του εφαπτομενικού τμήματος, $MD_{Tangential} = 7531 ft$
- ❖ Ολικό μετρούμενο Βάθος, $MD_{Target} = 10093 ft$
- ❖ Η γραφική απεικόνιση της τροχιάς της γεώτρησης

Περίπτωση 2



Εικόνα 4.2 : Σχεδιασμός τροχιάς

Σε περίπτωση που ο χρήστης να προσδιορίσει σε τι βάθος πρέπει να αρχίσει να παρεκκλίνει από την κατακόρυφο (KOP) η γεώτρηση έτσι ώστε ο σχηματισμός στόχος να προσεγγιστεί με συγκεκριμένη γωνία 30° και ρυθμό αύξησης γωνίας του τμήματος build up $3^\circ/100\text{ft}$ τότε θα έπαιρνε το αποτέλεσμα, μέσω της εξίσωσης (2.8) ως ακολούθως:

Δεδομένα :

- ❖ Στόχος σε κατακόρυφο βάθος, $TVD_{\text{target}} = 9650\text{ft}$,
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση στόχου από την κατακόρυφο, $HD_{\text{target}} = 2655\text{ft}$,
- ❖ Ρυθμός μεταβολής γωνίας κλίσης, $BUR = 3 \text{ deg}/100\text{ft}$
- ❖ Μέγιστη γωνία , $\theta = 30 \text{ deg}$

Και στα ζητούμενα πλέον είναι το βάθος του KOP. Η νέα τροχιά της γεώτρησης που θα προσεγγίσει το στόχο υπό τις καθορισμένες συνθήκες αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.2, καμπύλη (1) (κίτρινη).

Ζητούμενα - Αποτελέσματα:

- ❖ Ακτίνα καμπυλότητας του καμπυλόγραμμου τμήματος $R = 1909.8 \text{ ft}$
- ❖ Βάθος πρώτης παρέκκλισης KOP = 4539.3 ft
- ❖ Μήκος του καμπυλόγραμμου τμήματος. $MD_{\text{Build up Sect.}} = 1000 \text{ ft}$

- ❖ Κατακόρυφο βάθος του σημείου που τελειώνει το καμπυλόγραμμο τμήμα,
 $TVD_{\text{End of Build}} = 5508.23 \text{ ft}$
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση του σημείου που τελειώνει το καμπυλόγραμμο τμήμα
 $HD_{\text{End of Build}} = 255.87 \text{ ft}$
- ❖ Μήκος του εφαπτομενικού τμήματος $MD_{\text{Tangential}} = 4788.28 \text{ ft}$
- ❖ Ολικό μετρούμενο Βάθος $MD_{\text{Target}} = 10337 \text{ ft}$

Συγκριτικά η τροχιά της περίπτωσης 2 προσεγγίζει τον στόχο διανύοντας 244ft περισσότερα. Επιπροσθέτως παρατηρούμε πως αφού η τροχιά της περίπτωσης 1 (καμπύλη 0, μπλε) έχει μέγιστη κλίση 11.7 μοίρες λιγότερες σε σχέση με την τροχιά της περίπτωσης 2 όπως επίσης μικρότερο ρυθμό αύξησης καμπυλότητας, ως αποτέλεσμα η τροχιά 0 (μπλε) είναι πιο ομαλή.

Οι τρεις αυτές παράμετροι (BUR, KOP, θ) συνδέονται μεταξύ τους και εξαρτάται η μία από την άλλη. Έτσι το πρόγραμμα αποτρέπει τον χρήστη να εισάγει και τις τρεις ταυτόχρονα προειδοποιώντας πως θα πρέπει να συμπληρώνονται οι δύο από τις τρεις κάθε φορά.

Προσδιορισμός παραμέτρων (MD, HD, TVD, θ') τυχαίου σημείου επί της τροχιάς

Στις Εικόνες 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των παραμέτρων που αφορούν κάθε τυχαίο σημείο επί της τροχιάς των ακόλουθων παραμέτρων:

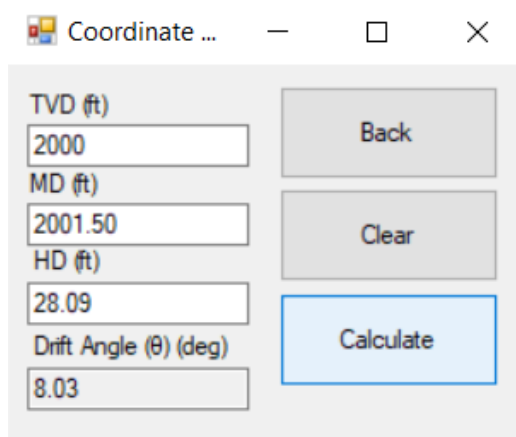
- ❖ Κατακόρυφο βάθος (TVD)
- ❖ Μετρούμενο βάθος (MD)
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση (HD)
- ❖ Γωνίας κλίσης (θ')

Η γωνία κλίσης θ' ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2 μέρος 2.1.2. Ισούται με την γωνία κλίσης κάθε σημείου που βρίσκεται στο καμπυλόγραμμο τμήμα που ορύσσεται με αυξανόμενο ρυθμό γωνίας κλίσης. Κατά την όρυξη του εφαπτομενικού τμήματος η γωνία κλίσης είναι σταθερή και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της (η μέγιστη τιμή της γωνίας κλίσης έχει οριστεί ως θ). Το πρόγραμμα θα υπολογίζει κάθε φορά αυτή την παράμετρο χωρίς να δίνει την δυνατότητα να την εισάγει ο χρήστης ως δεδομένο.

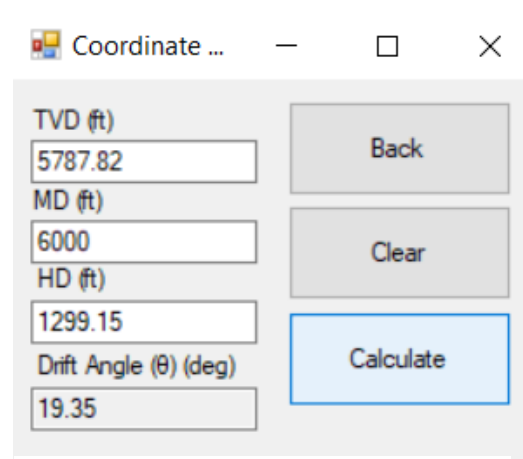
Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να συμπληρώσει μία από τις τρεις παραμέτρους (MD, TVD, HD) για την οποία τον ενδιαφέρει να γνωρίζει την τιμή των υπολοίπων. Στο

παράδειγμα της Εικόνας 4.3 υπολογίζεται το μετρούμενο βάθος, η οριζόντια μετατόπιση και η γωνία κλίσης σε ένα τυχαίο σημείο της τροχιάς με κατακόρυφο βάθος TVD= 2000ft. Αντίστοιχα στο παράδειγμα της Εικόνας 4.4 παρουσιάζονται ίδιοι υπολογισμοί για τυχαίο σημείο της τροχιάς σε κατακόρυφο βάθος TVD=6000ft. Και οι δύο υπολογισμοί αφορούν στην τροχιά 0 (μπλε) της Εικόνας 4.2.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ορθή εξαγωγή των αποτελεσμάτων έχουν αποδειχθεί και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, μέρος 2.1.2, εξισώσεις (2.20) και (2.23)



Εικόνα 4.3 : Υπολογισμός MD, HD και θ' για τροχιά 0 της Εικόνας 4.2



Εικόνα 4.4 : Υπολογισμός TVD, HD και θ' για τροχιά (0) της Εικόνας 4.2

Σε περίπτωση που ενδιαφέρει η παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων καθ' όλο το μήκος της γεώτρησης το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα αυτή μέσω της σύνοψης σειράς υπολογισμών σε πίνακα δεδομένων (Data Grid). Στην Εικόνα 4.5 φαίνεται πως το λογισμικό υπολογίζει το κατακόρυφο βάθος, την οριζόντια μετατόπιση και την γωνία παρέκκλισης για την γεώτρηση (0) της Εικόνας 4.2 ανά κάθε 5ft μετρούμενου βάθους. Τέλος δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εξάγει εύκολα αυτά τα αποτελέσματα σε φύλλο Microsoft Excel δίνοντας του μία επιθυμητή ονομασία.

	MD (ft)	HD (ft)	TVD (ft)	θ (deg)
	0	0	0	0
	1600	0	1600	0
	1605	0.00	1605.00	0.10
	1610	0.02	1610.00	0.20
	1615	0.04	1615.00	0.30
	1620	0.07	1620.00	0.40
	1625	0.11	1625.00	0.50
	1630	0.16	1630.00	0.60
	1635	0.21	1635.00	0.70
	1640	0.28	1640.00	0.80
	1645	0.35	1645.00	0.90
	1650	0.44	1650.00	1.00
	1655	0.53	1655.00	1.10

Εικόνα 4.5 : Φόρμα υπολογισμού παραμέτρων ανά 5ft μετρούμενου βάθους και εξαγωγή στο excel

4.2.2. Εφαρμογή 2

Ο στόχος της εφαρμογής 2 είναι ο σχεδιασμός εναλλακτικών τροχιών τύπου Build & Hold για την προσέγγιση του ίδιου στόχου με συνεχώς αυξανόμενη μέγιστη γωνία κλίσης και ως εκ τούτου μεταβαλλόμενο ρυθμό αύξησης καμπυλότητας, ενώ το βάθος πρώτης παρέκκλισης θα διατηρείται σταθερό.

σχεδιασμού τροχιάς τύπου Build & Hold.

Δεδομένα :

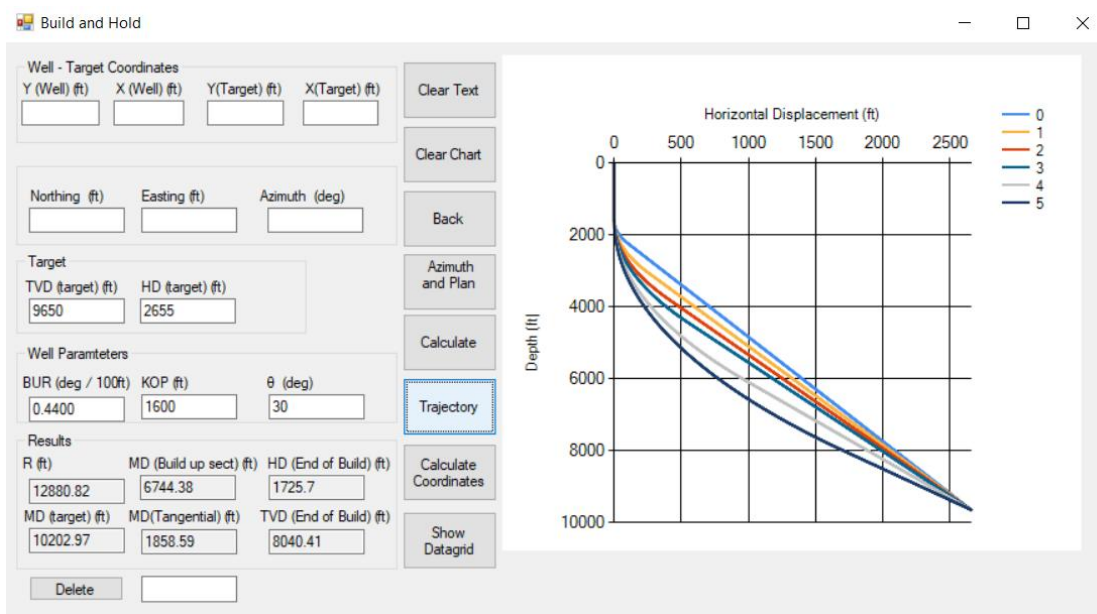
- ❖ Στόχος σε κατακόρυφο βάθος, $TVD_{target} = 9650ft$,
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση στόχου από την κατακόρυφο, $HD_{target} = 2655ft$
- ❖ Βάθος πρώτης παρέκκλισης, $KOP = 1600ft$
- ❖ Μέγιστη γωνία, $\theta = 19$ έως 30 deg

Το παράδειγμα θα επιλυθεί 6 φορές οπότε **αναπαράγονται 6 διαφορετικές τροχιές** (μία για κάθε διαφορετική γωνία θ). Οι τροχιές που προκύπτουν παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 4.6 ενώ τα αποτελέσματα ως προς τη μεταβολή του BUR φαίνονται στον Πίνακα 4.1 Πίνακας 4.1.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα εφαρμογής 4.2.2

Αριθμός καμπύλης	Inclination Angle (θ) ($^{\circ}$)	Kick off Point (ft)	Build up Rate (%/100ft) (Ζητούμενο)
0	19	1600	2.83
1	20	1600	1.34
2	21	1600	0.94
3	22	1600	0.75
4	25	1600	0.54
5	30	1600	0.44

Εύκολα παρατηρείται πως με την αύξηση της γωνίας θ ο ρυθμός αύξησης γωνίας κλίσης μειώνεται βαθμιαία υπό σταθερό KOP. Έτσι, το καμπυλόγραμμο τμήμα της γεώτρησης (Build) συνεχώς αυξάνει σε μήκος, αυτό δηλώνεται ουσιαστικά μέσω της παραμέτρου « $MD_{\text{End of Build}}$ » που αφορά στο μετρούμενο βάθος έως το πέρας του καμπυλόγραμμου τμήματος.



Εικόνα 4.6 : Σχεδιασμός εναλλακτικών τροχιών τύπου Build & Hold για την προσέγγιση του ίδιου στόχου με συνεχώς αυξανόμενη μέγιστη γωνία κλίσης

Να σημειωθεί πως για την διαγραφή μιας τροχιάς από το διάγραμμα που παράγεται από το πρόγραμμα, αρκεί ο χρήστης να πληκτρολογήσει τον αριθμό της ανεπιθύμητης τροχιάς στο κελί δεξιά του κουμπιού «Delete» και στη συνέχεια να το πατήσει.

4.2.3. Εφαρμογή 3

Η εφαρμογή 3 έχει στόχο να παρουσιάσει την δυνατότητα που δίνει το πρόγραμμα για την εύκολη σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς μεταβάλλονται σταδιακά διάφοροι παράμετροι που αφορούν τη γεώτρηση. Ζητούμενο στην περίπτωση αυτή είναι ο σχεδιασμός εναλλακτικών τροχιών Build & Hold και ο προσδιορισμός του σημείο πρώτης παρέκκλισης (KOP) για κάθε γεώτρηση. Στην περίπτωση θα μεταβάλλεται ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης (BUR) και ταυτόχρονα θα μεταβάλλεται η γωνία μέγιστης κλίσης (θ) από γεώτρηση σε γεώτρηση για την προσέγγιση του ίδιου στόχου με τα στοιχεία που ορίζονται ως δεδομένα παρακάτω:

- ❖ Στόχος σε κατακόρυφο βάθος, $TVD_{target} = 9650ft$,
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση στόχου από την κατακόρυφο, $HD_{target} = 2655ft$
- ❖ Ρυθμός μεταβολής γωνίας κλίσης, $BUR = 0.5$ έως $3 \text{ deg}/100ft$
- ❖ Μέγιστη γωνία , $\theta = 19$ έως 25 deg

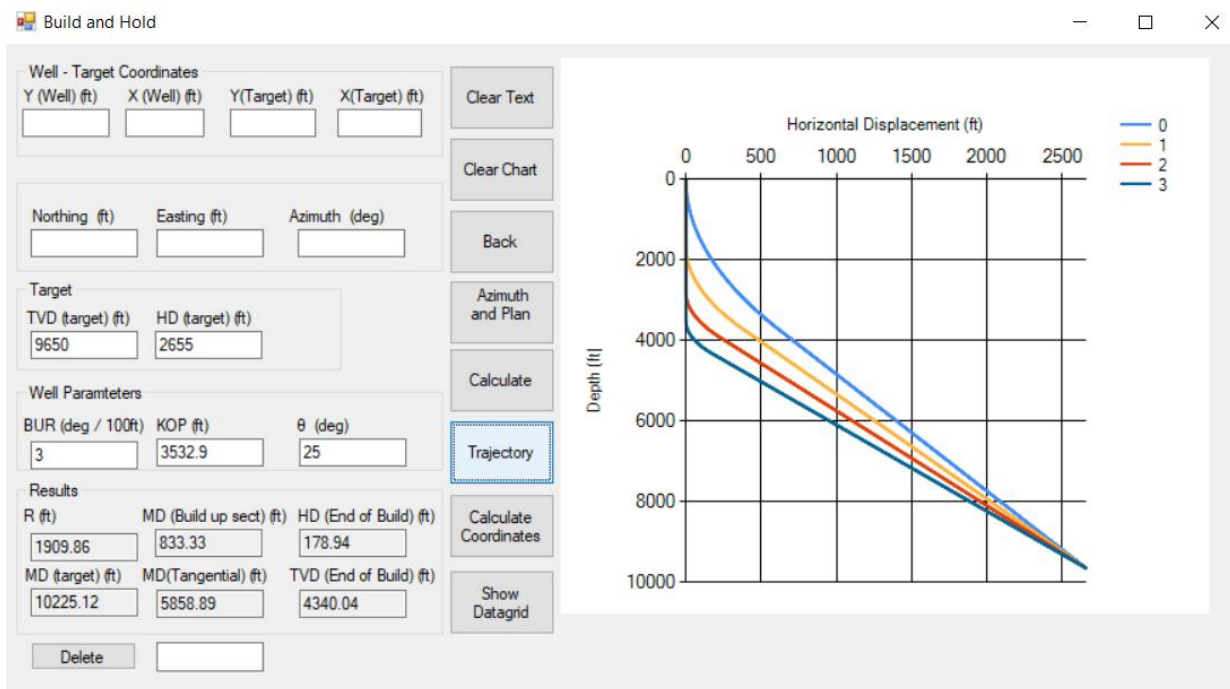
Ο χρήστης του προγράμματος θα πρέπει να γνωρίζει πως πάντα **θα δίνει ως δεδομένα τις δύο εκ των τριών παραμέτρων BUR, KOP, θ** . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 ενώ στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζεται η τροχιά της γεώτρησης σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα εφαρμογής 4.2.2

Αριθμός καμπύλης	Build up Rate ($^{\circ}/100ft$)	Inclination Angle (θ) ($^{\circ}$)	Kick off Point (ft) (Ζητούμενο)
0	0.5	19	21.7
1	1	21	1671
2	2	23	2812.4
3	3	25	3532.9

Είναι σαφές ότι όσο αυξάνει ο ρυθμός αύξησης γωνίας κλίσης και πρακτικά όσο αυξάνεται η γωνία του κύκλου με την οποία διαγράφεται το καμπυλόγραμμο τμήμα, δηλαδή η γωνία

κλίσης, για να προσεγγιστεί ο ίδιος στόχος, πρέπει να αυξηθεί σημαντικά το βάθος του ΚΟΡ.



Εικόνα 4.7 : Σχεδιασμός εναλλακτικών τροχιών με συνεχώς αυξανόμενη γωνία μέγιστης κλίσης (θ) και ρυθμό αύξησης καμπυλότητας (BUR)

4.2.4. Παρατηρήσεις-Σχόλια

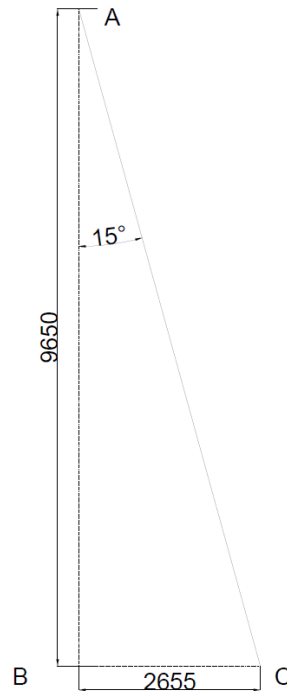
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως κάθε είδους υπολογιστικό πρόγραμμα παρέχει μία σειρά αποτελεσμάτων, τα οποία θα πρέπει να αξιολογούνται από το χρήστη και να ερμηνεύονται κατάλληλα. Για να γίνει αυτό ποιο σαφές, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα σχεδιασμού μίας γεώτρησης τύπου Build & Hold όπου, η μη σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μπορεί να οδηγήσει σε πλήρως λανθασμένη εκτίμηση.

Έστω για την περίπτωση του παραδείγματος της Εικόνας 4.8 όπου για τον σχηματισμό στόχο ισχύει:

- ❖ Κατακόρυφο βάθος, $TVD_{target} = 9650ft$,
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση, $HD_{target} = 2655ft$

Αν υποθέσουμε ότι **το βάθος έναρξης της παρέκκλισης βρίσκεται στα 0ft** δηλαδή στο επίπεδο του εδάφους και ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης είναι αρκετά υψηλός ώστε

το καμπυλόγραμμο τμήμα να έχει αμελητέο μήκος², τότε η γωνία προσβολής του στόχου με ευθύγραμμο τμήμα όπως προκύπτει από την Εικόνα 4.8 θα είναι:

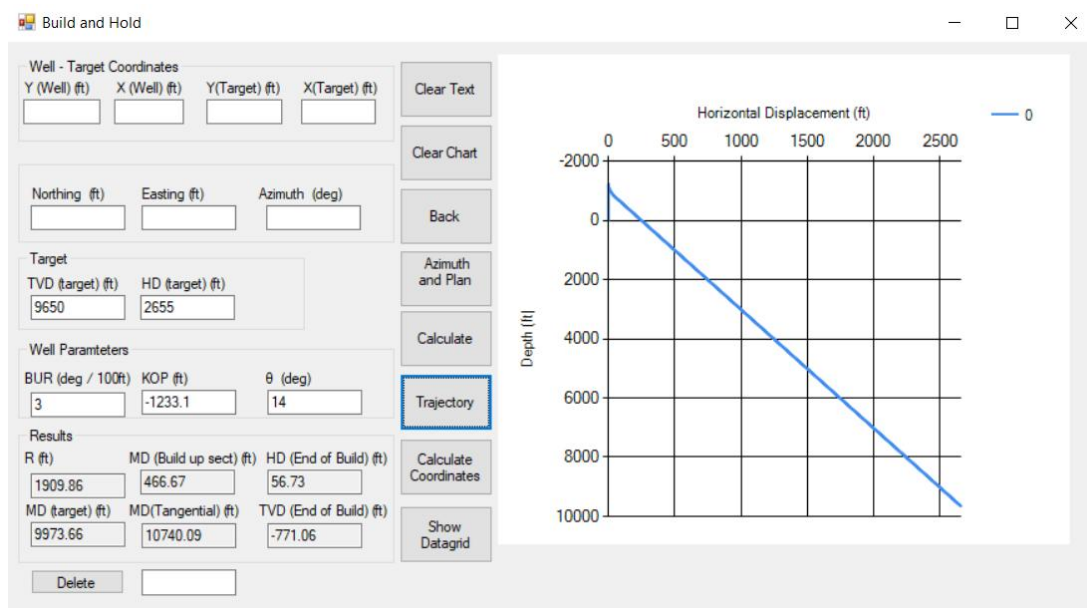


Εικόνα 4.8 : Η ελάχιστη γωνία προσβολής του στόχου

$$\theta = \tan^{-1} \theta = \frac{BC}{AB} = \frac{2655}{9650} = 15.38^{\circ} \quad (4.5)$$

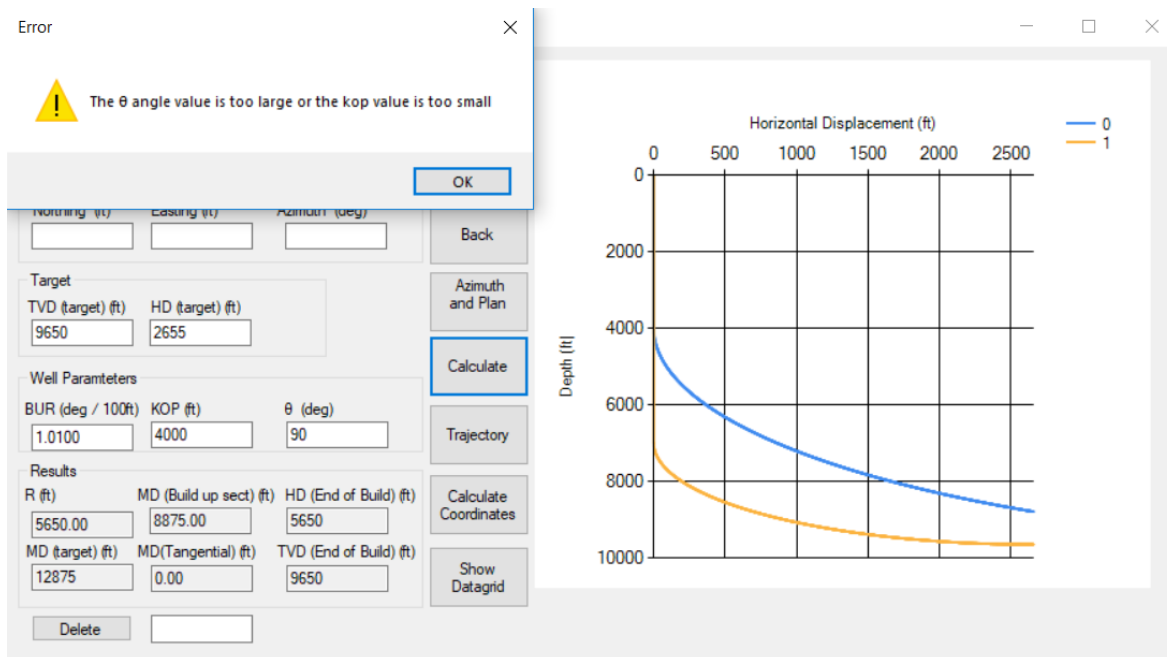
Πρόκειται για την ελάχιστη δυνατή γωνία που μπορεί να επιτευχθεί θεωρητικά σε αυτήν την γεώτρηση. Ως εκ τούτου, αν ο χρήστης αναζητά το βάθος KOP για το οποίο η μέγιστη κλίση της γεώτρησης επιλέγεται να είναι 14° (άρα ο στόχος να προσεγγίζεται με γεώτρηση γωνίας κλίσης 14° μοιρών) τα αποτελέσματα που θα πάρει αντιστοιχούν σε μια τροχιά (Εικόνα 4.9, καμπύλη 0) που, υπό τις δεδομένες απαιτήσεις/επιλογές, το σημείο KOP προσδιορίζεται σε βάθος -1233.1 δηλαδή πάνω από την επιφάνεια του εδάφους !

² Ισχύει ότι σε μία γεώτρηση όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης τόσο γρηγορότερα θα επιτευχθεί η γωνία μέγιστης κλίσης (αφού η κλίση θα αυξάνει απότομα) και επομένως τόσο μικρότερο θα είναι το μήκος του καμπυλόγραμμου τμήματος.



Εικόνα 4.9: Η τροχιά της γεώτρησης για γωνία προσβολής 14°

Αντίστοιχα, για το ίδιο παράδειγμα, εάν επιλέγεται η γεώτρηση να προσεγγίσει το στόχο με γωνία 90° και με σημείο έναρξης της παρέκκλισης (KOP) στα 4000ft, η τροχιά που προσδιορίζεται είναι αυτή της Εικόνας 4.10, καμπύλη (0) (μπλε) η οποία, δεν καταλήγει στον στόχο. Αυτό συμβαίνει διότι οσοδήποτε μικρός και αν γίνει ο ρυθμός αύξησης της γωνίας του καμπυλόγραμμου τμήματος, δεν μπορεί η γεώτρηση να προσεγγίσει το στόχο με την ζητούμενη γωνία των 90° όταν η οριζόντια μετατόπιση του είναι στα 2655ft. Ο χρήστης, σε τέτοιες περιπτώσεις, ειδοποιείται με αναδυόμενο μήνυμα που προειδοποιεί πως το αποτέλεσμα οφείλεται είτε στην μικρή τιμή KOP, είτε στην μεγάλη τιμή της γωνίας θ που απαιτήθηκε και τον οδηγεί να κινηθεί σε άλλες επιλογές για τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού. Αντίθετα, για KOP στα 7000ft οι συνθήκες ικανοποιούνται και η σχεδιαζόμενη τροχιά αντιστοιχεί στην καμπύλη 1 (κίτρινη).



Εικόνα 4.10 : Χάραξη δύο γεωτρήσεων με KOP στα 4000ft (0) και 7000ft (1)

4.3. Σχεδιασμός οριζόντιας προβολής της τροχιάς Build & Hold με προκαθορισμένη στροφή επί του οριζοντίου επιπέδου X-Y, με τη χρήση λογισμικού

Σε αντίθεση με το σχεδιασμό που παρουσιάζεται στο μέρος 4.2 όπου μεταβάλλεται μεν η κλίση αλλά παραμένει σταθερό το αζιμούθιο, άρα η προβολή της τροχιάς στο οριζόντιο επίπεδο είναι ευθύγραμμο τμήμα σταθερής γωνίας, στο μέρος αυτό παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της τροχιάς στο οριζόντιο επίπεδο, όταν ακολουθεί και μεταβαλλόμενη διεύθυνση για να προσεγγίσει το στόχο.

Ο σκοπός του προγράμματος σε αυτή την περίπτωση είναι να αποδώσει την κάτοψη (ή οριζόντια προβολή) της τροχιάς της γεώτρησης καθώς και τα βασικά μεγέθη όπως την ακτίνα καμπυλότητας (R) του τμήματος με μεταβαλλόμενο αζιμούθιο και τον ρυθμό αλλαγής αζιμούθιου (Turn Rate).

Το πρόγραμμα παρέχει τρεις δυνατότητες :

1. Υπολογισμό τροχιάς με συνεχή και σταδιακή μεταβολή αζιμούθιου
2. Υπολογισμό τροχιάς με σταθερό αζιμούθιο για κάποια προχώρηση και μεταβαλλόμενο στη συνέχεια

3. Υπολογισμό της ακτίνας καμπυλότητας (R) (του τμήματος με μεταβαλλόμενο αζιμούθιο) ή κατ' επέκταση του ρυθμού μεταβολής του αζιμούθιου (Turn Rate) σε κάθε περίπτωση.

Στην περίπτωση 1 τα δεδομένα είναι:

- ❖ Οι συντεταγμένες του σχηματισμού στόχου ως προς την εξέδρα του γεωτρήπανου (Northing, Easting)
- ❖ Η γωνία οδήγησης του κοπτικού (Lead angle) ως προς το αζιμούθιο του στόχου.

Στην περίπτωση 2 πρόσθετα δεδομένα είναι:

- ❖ Το μήκος της τροχιάς υπό σταθερό αζιμούθιο (Lead Angle Length)
- ❖ Ο ρυθμός αύξησης καμπυλότητας (BUR) του εν λόγω τμήματος επί του κατακόρυφου επιπέδου.

Να σημειωθεί πως η εξέδρα του γεωτρήπανου θα απεικονίζεται κάθε φορά στο σημείο τομής των αξόνων X-Y. Επιπροσθέτως, το πρόγραμμα σχεδιάστηκε με την παραδοχή πως μία αρνητική τιμή της γωνίας οδήγησης του κοπτικού αντιστοιχεί σε τροχιά που θα προσεγγίσει τον στόχο από αριστερά (Left Hand Walk), ενώ με μία θετική τιμή της γωνίας οδήγησης του κοπτικού ο στόχος θα προσεγγιστεί από την δεξιά του μεριά (Right Hand Walk).

4.3.1. Εφαρμογή

Στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζεται, η οριζόντια προβολή της μιας γεώτρησης που πρόκειται να προσεγγίσει ένα στόχο με συντεταγμένες:

- ❖ Northing = -1800ft
- ❖ Easting = 1200 ft και
- ❖ Γωνία οδήγησης του κοπτικού, Lead Angle = 17°

Επιλέχθηκε θετική γωνία οδήγησης του κοπτικού επομένως, αρχικά το αζιμούθιο της γεώτρησης θα είναι κατά 17° μεγαλύτερο του αζιμούθιου του στόχου.

Η πορεία της γεώτρησης είναι αρχικά με σταθερό αζιμούθιο για κάποιο μετρούμενο μήκος το οποίο διαγράφεται με τα παρακάτω στοιχεία:

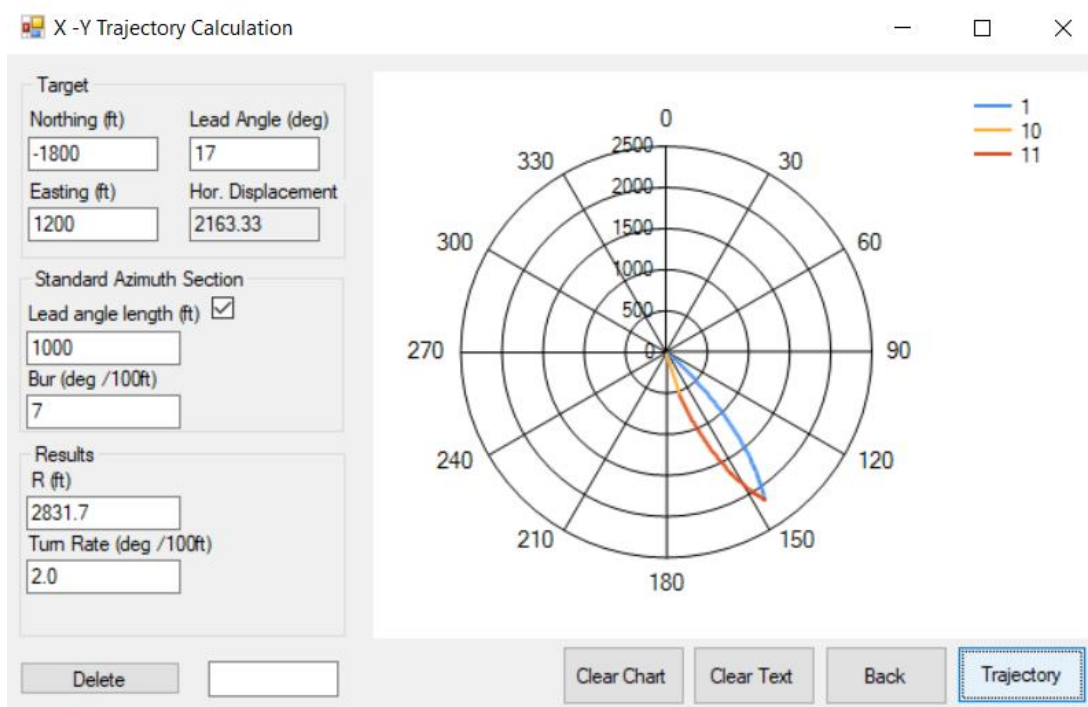
- ❖ Μετρούμενο μήκος, Lead Angle Length = 1000ft

- ❖ Ρυθμός αύξησης γωνίας κλίσης του τμήματος με σταθερό αζιμούθιο, BUR= 7 deg/100ft

Στη συνέχεια, η τροχιά στρέφεται σε διεύθυνση και το αζιμούθιο μεταβάλλεται με ρυθμό μειούμενο .

Τα πρώτα 1000ft που θα διατηρηθούν με σταθερό αζιμούθιο αποτυπώνονται από την καμπύλη 10. Στην συνέχεια, η καμπύλη (11) Εικόνα 4.11 υπολογίζεται πως θα χαραχθεί με ακτίνα καμπυλότητας 2879.6ft και ρυθμό μείωσης αζιμούθιου 2°/100ft. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της τροχιάς παρουσιάστηκαν στο μέρος 2.2 και είναι οι εξισώσεις (2.28) και (2.29).

Η καμπύλη 1 Εικόνα 4.11 προσεγγίζει τον στόχο από τα αριστερά και αντιπροσωπεύει την οριζόντια προβολή γεώτρησης στην οποία το αζιμούθιο αυξάνεται σταθερά και δεν υπάρχει τμήμα σταθερού αζιμούθιου.



Εικόνα 4.11 : Σχεδιασμός οριζόντιας προβολής τροχιάς

4.4. Προσδιορισμός της τροχιάς κεκλιμένης γεώτρησης κατά τη διάτρηση με τη χρήση λογισμικού

Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της τροχιάς της γεώτρησης με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων που λαμβάνονται σε κάθε σταθμό στη βάση των μεθοδολογιών που έχουν αναλυτικά παρουσιαστεί στο μέρος 3.3 δίνοντας τη δυνατότητα στο μηχανικό γεωτρήσεων, με τη χρήση του λογισμικού, να παρακολουθεί επιτόπου στο εργοτάξιο την πορεία της ορυσσόμενης γεώτρησης και τη σύγκριση της με την σχεδιασθείσα.

Όπως έχει αναφερθεί στο μέρος 3.3 οι μετρήσεις των παραμέτρων που απαιτείται κάθε φορά να εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου είναι:

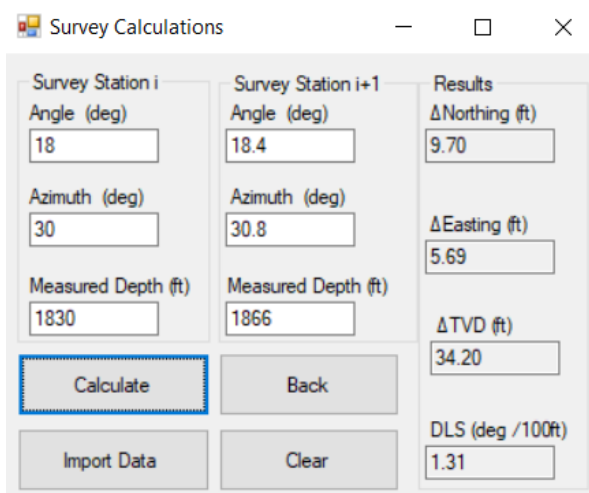
- ❖ Γωνία κλίσης (Angle -I), για κάθε έναν σταθμό
- ❖ Αζιμούθιο (Azimuth-A), για κάθε έναν σταθμό
- ❖ Συνολικό μετρούμενο βάθος (Measured Depth-MD), σε κάθε έναν σταθμό

Οι μετρήσεις εκτελούνται σε διαδοχικούς σταθμούς, από σημείο i (σταθμό i) σε σημείο $i+1$ (σταθμό $i + 1$). Ως αποτέλεσμα υπολογίζονται **οι μεταβολές** των ακόλουθων παραμέτρων μεταξύ των διαδοχικών σταθμών:

- ❖ Συντεταγμένη Βορρά-Νότου (Δ Northing)
- ❖ Συντεταγμένη Ανατολή-Δύση (Δ Easting)
- ❖ Κατακόρυφο Βάθος (True Vertical Depth- Δ TVD)
- ❖ Σοβαρότητα γωνίας Dog Leg (Dog Leg Severity-DLS)

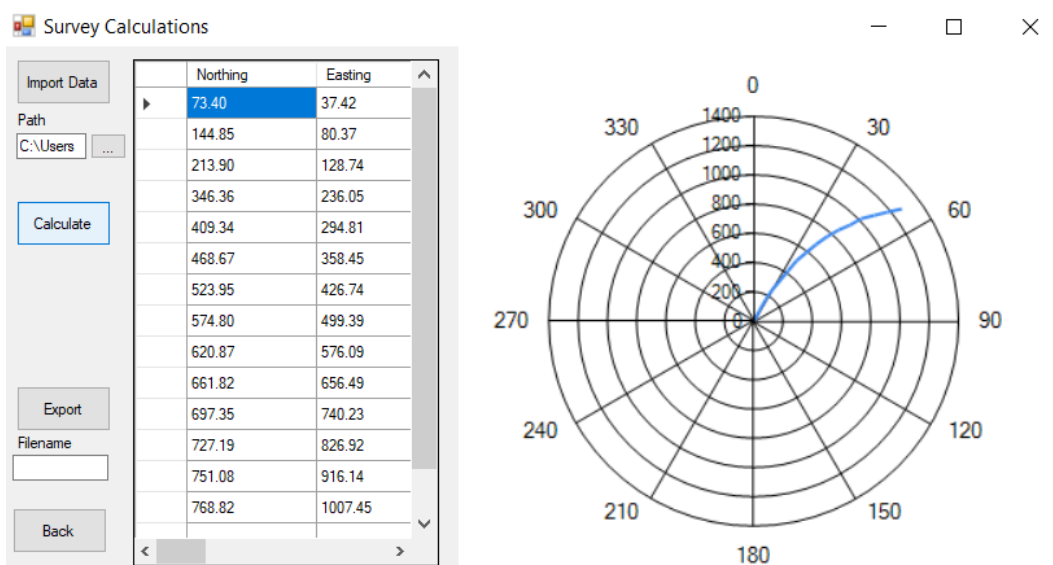
Γίνεται χρήση της μεθόδου της ελάχιστης καμπυλότητας καθώς θεωρείται η πιο ακριβής και αξιόπιστη όπως ήδη αναφέρθηκε. Παρ' όλα αυτά θα ήταν χρήσιμο να παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού των ζητούμενων παραμέτρων μέσω όλων των δυνατών μεθόδων ώστε να αξιολογούνται συγκριτικά τόσο οι μέθοδοι όσο και τα αποτελέσματα.

Στην Εικόνα 4.12 απεικονίζεται η φόρμα υπολογισμού των ζητούμενων παραμέτρων. Στα πεδία που αντιστοιχούν σε κάθε σταθμό "Survey station i & $i+1$ " συμπληρώνεται η τριάδα δεδομένων όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις (I, A, MD). Δεξιά στο πεδίο "Results", εμφανίζονται τα αποτελέσματα, δηλαδή οι **μεταβολές από σταθμό σε σταθμό** των παραμέτρων Northing, Easting, True Vertical Depth καθώς και η DLS.

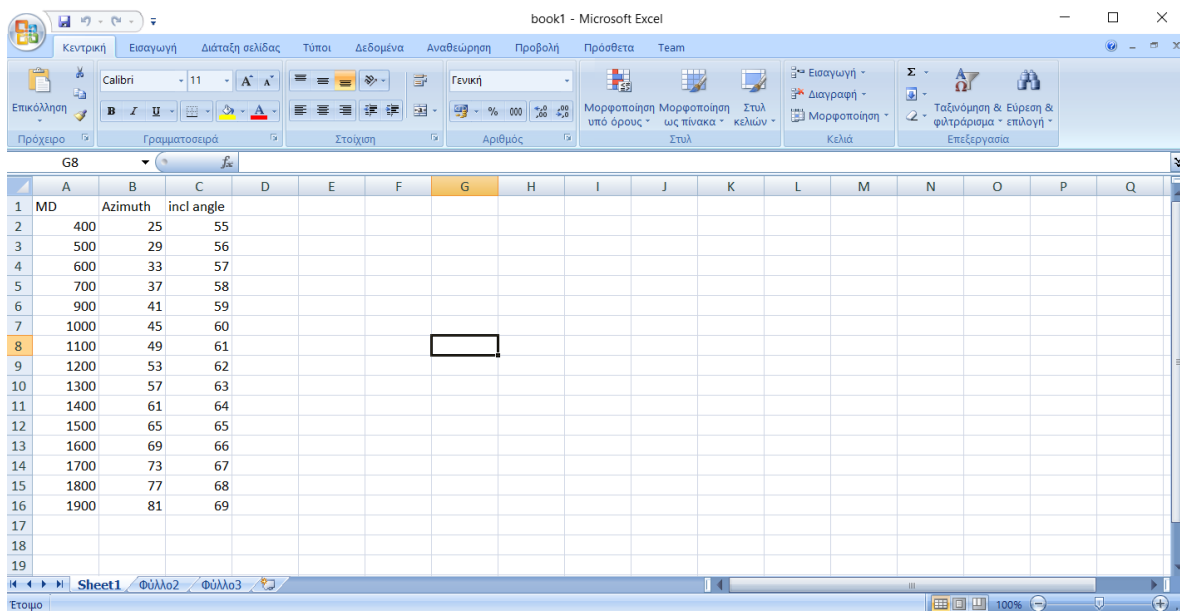


Εικόνα 4.12 : Φόρμα υπολογισμών με τη μέθοδο ελάχιστης καμπυλότητας

Πολύ συχνά υπάρχει η ανάγκη για την ταυτόχρονη επεξεργασία δεδομένων από πολλούς σταθμούς. Η φόρμα που παρουσιάστηκε μπορεί να διαχειρίζεται πληροφορία που προέρχεται από δύο σταθμούς μετρήσεων. Η επιλογή “Import Data” μεταβιβάζει τον χρήστη στην φόρμα που φαίνεται στην Εικόνα 4.13. που εισάγονται τα δεδομένα των μετρήσεων μέσω αρχείου Excel (Εικόνα 4.14). Ακολουθεί η πραγματοποίηση των υπολογισμών και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε πίνακα. Ταυτόχρονα εμφανίζεται και η δισδιάστατη απεικόνιση της γεώτρησης στο επίπεδο X-Y (δηλαδή σε κάτοψη). Σε αυτό το σημείο ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εξάγει τον πίνακα αποτελεσμάτων σε αρχείο τύπου Excel.



Εικόνα 4.13 : Πίνακας αποτελεσμάτων και οριζόντια προβολή πραγματικής γεώτρησης στη βάση των μετρήσεων από σταθμό σε σταθμό.



The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	MD	Azimuth	incl angle														
2		400	25	55													
3		500	29	56													
4		600	33	57													
5		700	37	58													
6		900	41	59													
7		1000	45	60													
8		1100	49	61													
9		1200	53	62													
10		1300	57	63													
11		1400	61	64													
12		1500	65	65													
13		1600	69	66													
14		1700	73	67													
15		1800	77	68													
16		1900	81	69													
17																	
18																	
19																	

Εικόνα 4.14 : : Εισαγωγή δεδομένων μετρήσεων σε φύλλο Excel

Πρέπει να διευκρινιστεί πως το αρχείο τύπου Excel εισαγωγής δεδομένων πρέπει να διαθέτει το σύνολο των δεδομένων στο πρώτο φύλλο που θα ονομάζεται «Sheet1». Επιπλέον οι τίτλοι κάθε στήλης παραμέτρων πρέπει να έχουν τις εξής ονομασίες: «MD», «Azimuth» και «incl angle» ώστε να εισάγονται σωστά οι τιμές τους από το λογισμικό.

4.4.1. Σύγκριση πραγματικής και σχεδιασθείσας τροχιάς

Όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστή κάθε στιγμή η πορεία της πραγματικής γεώτρησης έτσι ώστε να μπορεί να συγκριθεί με την σχεδιασθείσα τροχιά και να διαπιστωθεί αν τελικά αυτή ακολουθεί την επιθυμητή πορεία. Αυτό επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω του λογισμικού που δημιουργήθηκε. Στο μέρος 4.2.1 αναδείχθηκε η ικανότητα του προγράμματος να εξάγει αποτελέσματα σχετικά με τη θέση κάθε σημείου της τροχιάς Build & Hold σε φύλλο Excel. Η ίδια δυνατότητα δίνεται και στο σημείο υπολογισμού της πραγματικής τροχιάς όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι τα αποτελέσματα εύκολα μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους.

4.5. Οδηγώντας προς τον στόχο με προγραμματισμένο βηματισμό μεταβολής αζιμούθιου

Στο μέρος 4.3 της εργασίας παρουσιάστηκε η φόρμα του προγράμματος με την οποία σχεδιάζεται η τροχιά της γεώτρησης στο οριζόντιο επίπεδο (επίπεδο X-Y) έτσι ώστε αυτή

να προσεγγίσει τον στόχο με ακρίβεια. Στην περίπτωση αυτή ο χρήστης καλείται να επιλέξει τις κατάλληλες παραμέτρους έτσι ώστε εκείνος να οδηγήσει την τροχιά προς το στόχο. Σκοπός του προγράμματος είναι η οπτικοποιημένη αξιολόγηση της επίδρασης της μεταβολής των παραμέτρων που παρουσιάζονται παρακάτω επί της οριζόντιας προβολής της τροχιάς της γεώτρησης και του τρόπου αλλά και των συνθηκών υπό τις οποίες αυτή προσεγγίζει το στόχο.

Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που καλείται να επιλέξει ο χρήστης είναι:

- ❖ Το βάθος του σημείου παρέκκλισης (KOP)
- ❖ Το ολικό μετρούμενο βάθος (MD)
- ❖ Ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης της γεώτρησης σε όλο το μήκος της (BUR)
- ❖ Η γωνία «οδήγησης του κοπτικού» (Lead Angle)
- ❖ Το μήκος του τμήματος με σταθερό αζιμούθιο (Lead Angle Length)
- ❖ Ο ρυθμός μεταβολής του αζιμούθιου (Turn Rate)
- ❖ Το βήμα κατά το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί της τροχιάς (ΔMD)

Παράλληλα, τα αποτελέσματα που εξάγει το πρόγραμμα είναι:

- ❖ Το τελικό αζιμούθιο της γεώτρησης, (Final Well's Azimuth)
- ❖ Η τελική οριζόντια μετατόπιση της γεώτρησης, (Well's HD)

Επιπλέον, όσον αφορά **τα στοιχεία του στόχου** πρέπει να εισαχθούν **δύο εκ των παραμέτρων Northing, Easting, Azimuth**, όπως και η ακτίνα του κύκλου **R** μέσα στον οποίο θα βρίσκεται ο σχηματισμός στόχος. Ως αποτέλεσμα θα υπολογίζεται η οριζόντια μετατόπιση του στόχου (HD_{target}). Το αζιμούθιο και η οριζόντια μετατόπιση **του στόχου** δεν θα πρέπει να συγχέονται με το τελικό αζιμούθιο και την οριζόντια μετατόπιση **της γεώτρησης**. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως ο σχηματισμός στόχος δεν αποτελεί ένα συγκεκριμένο σημείο αλλά αποδίδεται καλύτερα από μια σφαίρα στο χώρο ή ένα κύκλο στην οριζόντια προβολή της. Αποτελεί αυτό που ορίζεται ως «όριο ανοχής προσέγγισης του στόχου» και ο σχεδιασμός της τροχιάς αποκτά μια σχετική ευλυγισία στον τρόπο που μπορεί να προσεγγίσει το στόχο.

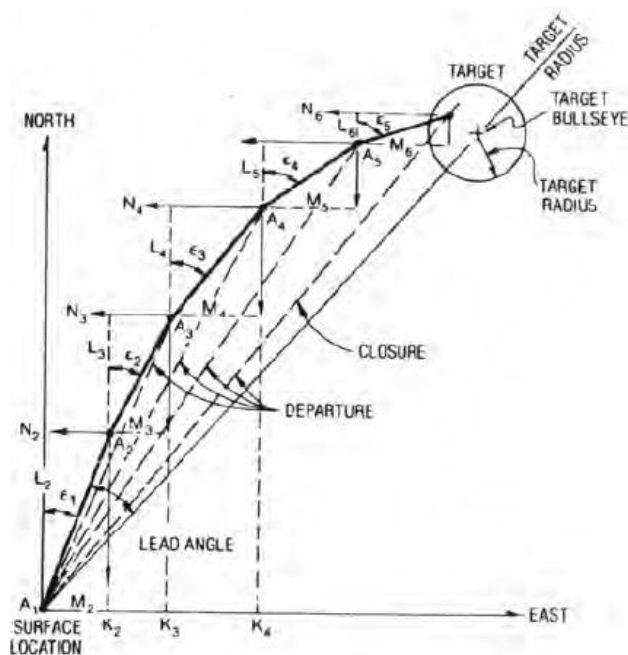
Η **γωνία οδήγησης παίρνει μόνο θετικές** τιμές και ο χρήστης θα επιλέγει χειροκίνητα την μεριά προσέγγισης του στόχου. Για παράδειγμα για να κινηθεί η γεώτρηση προς τα αριστερά (οπότε ο στόχος προσεγγίζεται από δεξιά) επιλέγεται Left Hand Walk. Το παραπάνω ισχύει και αντίστροφα.

Η μεθοδολογία αποτύπωσης της τροχιάς στηρίζεται στον προσδιορισμό των συντεταγμένων κάθε σημείου της τροχιάς με βάση τους επιλεγέντες ρυθμούς μεταβολής των γωνιών κλίσης και αζιμούθιου. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντεταγμένων είναι η (3.14) και η (3.15) της μεθόδου της ελάχιστης καμπυλότητας. Οι εν λόγω εξισώσεις επιλύονται επαναλαμβανόμενα καθώς αυξάνεται το μετρούμενο βάθος ανά βήμα ΔMD έως ότου η γεώτρηση να φτάσει το **προκαθορισμένο** ολικό μετρούμενο βάθος. Δηλαδή το λογισμικό ξεκινάει από το σημείο KOP και **ανά μήκος ΔMD** (δηλαδή σταδιακά για κάθε σημείο A_{1-6} της Εικόνας 4.15) υπολογίζει αρχικά την γωνία κλίσης και το αζιμούθιο με βάση τον ρυθμό μεταβολής γωνίας κλίσης & αζιμούθιου (BUR & Turn rate) και την γωνία οδήγησης του κοπτικού (Lead Angle). Στην συνέχεια μέσω της μεθόδου ελάχιστης καμπυλότητας θα υπολογιστεί η σχετική θέση (Northing & Easting) κάθε νέου σημείου (που απέχει ΔMD από το προηγούμενο) ως προς το προηγούμενο. Η διαδικασία αυτή θα επαναλαμβάνεται έως ότου προσεγγιστεί το ολικό μετρούμενο βάθος. Το λογισμικό θα ενώσει τα σημεία που θα προκύψουν από τους υπολογισμούς με αποτέλεσμα την αποτύπωση της οριζόντιας προβολής της τροχιάς της γεώτρησης. Τονίζεται πως **το ολικό μετρούμενο βάθος (MD) είναι μία παράμετρος που πρέπει να οριστεί από τον χρήστη**, καθώς μέσω αυτού το πρόγραμμα γνωρίζει σε ποιο μετρούμενο βάθος να σταματήσει τους υπολογισμούς. Η σωστή εκτίμηση του ολικού μετρούμενου βάθους θα επιβεβαιωθεί αν η γεώτρηση καταλήξει εντός του ορίου ανοχής προσέγγισης του στόχου.

Τα υπολογιζόμενα μεγέθη που αναφέρθηκαν (τελικό αζιμούθιο και οριζόντια μετατόπιση γεώτρησης), αφορούν στο αζιμούθιο και στην οριζόντια μετατόπιση της οριζόντιας προβολής του πυθμένα της γεώτρησης.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα δίνονται στις δύο διαστάσεις και ο ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης είναι σταθερός καθ' όλο το μήκος της εκάστοτε τροχιάς.

Η σωστή λειτουργία του προγράμματος προϋποθέτει πάντα τον ορισμό των συντεταγμένων και αζιμούθιου **του στόχου** όπως και την ακτίνα του ορίου ανοχής προσέγγισης του **εξ αρχής** και **στη συνέχεια** την προσπάθεια δημιουργίας της τροχιάς **της γεώτρησης**.



Εικόνα 4.15 : Υπολογισμός οριζόντιας προβολής τροχιάς (Bourgoyne Jr., και συν., 1991)

4.5.1. Εφαρμογή 1

Στην Εικόνα 4.16 δίνεται μία εφαρμογή της λειτουργίας του προγράμματος που συζητήθηκε. Όπως φαίνεται, οι συντεταγμένες του στόχου ως προς την εξέδρα του γεωτρήπανου είναι :

- ❖ Northing = 1000 ft
- ❖ Easting = 2000 ft

Το χωρίο που εγκλείει τον στόχο («όριο ανοχής προσέγγισης του στόχου») έχει ακτίνα:

- ❖ $R = 300 \text{ ft}$

Με το πάτημα του κουμπιού «Show Target» θα εμφανιστεί η ζώνη στην οποία περιέχεται ο στόχος (Εικόνα 4.16, «Curve1», «Curve2») καθώς και η οριζόντια μετατόπιση και το αζιμούθιο του στόχου :

- ❖ Azimuth = 63.4 deg
- ❖ $HD_{\text{target}} = 2236.7 \text{ ft}$

1^η Τροχιά

Οι αρχικές παράμετροι που επιλέγονται για να ορίσουν την πορεία της γεώτρησης τίθενται ως ακολούθως:

- ❖ Βάθος πρώτης παρέκκλισης, KOP = 1000 ft
- ❖ Ολικό μετρούμενο βάθος, MD_{BHA} = 4500 ft
- ❖ Ρυθμός αύξησης γωνίας κλίσης, Build up Rate = 2 deg/100ft
- ❖ Γωνία οδήγησης του κοπτικού, Lead Angle = 10 deg, στα δεξιά του στόχου
- ❖ Μήκος τμήματος σταθερού αζιμούθιου, Lead Angle Length = 400 ft
- ❖ Ρυθμός μείωσης αζιμούθιου, Turn Rate = 0.8 deg/100ft
- ❖ Βήμα εκτέλεσης υπολογισμών, ΔMD= 100 ft

Με το πάτημα του κουμπιού «Trajectory» εμφανίζεται η οριζόντια προβολή της τροχιάς της γεώτρησης σύμφωνα με τις ως άνω επιλεγείσες παραμέτρους. Ως αποτέλεσμα η γεώτρηση που προκύπτει (Εικόνα 4.16 καμπύλη 3, κόκκινη) θα χαρακτηρίζεται από:

- ❖ Τελικό αζιμούθιο, Final Well's Azimuth = 65.9 deg
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση, Well's HD = 1425.42 ft

Παρατηρείται πως οι συγκεκριμένες παράμετροι που επιλέχθηκαν οδηγούν μεν τη γεώτρηση προς τον στόχο (αφού το αζιμούθιο της γεώτρησης(65.9°) πλησιάζει αυτό του στόχου(63.4°)), όμως αυτός δεν προσεγγίζεται αφού η οριζόντια μετατόπιση της γεώτρησης(1425ft) απέχει τουλάχιστον 800 ft από την οριζόντια μετατόπιση του στόχου(2236ft).

2^η Τροχιά

Ο χρήστης καλείται να επιλέξει και να μεταβάλει οποιαδήποτε από τις παραπάνω παραμέτρους ώστε να οδηγήσει τη γεώτρηση εντός του «ορίου ανοχής προσέγγισης του στόχου».

Έστω ότι επιλέγεται η μεταβολή του ολικού μετρούμενου βάθους ορίζεται στα :

- ❖ MD = 5000ft.

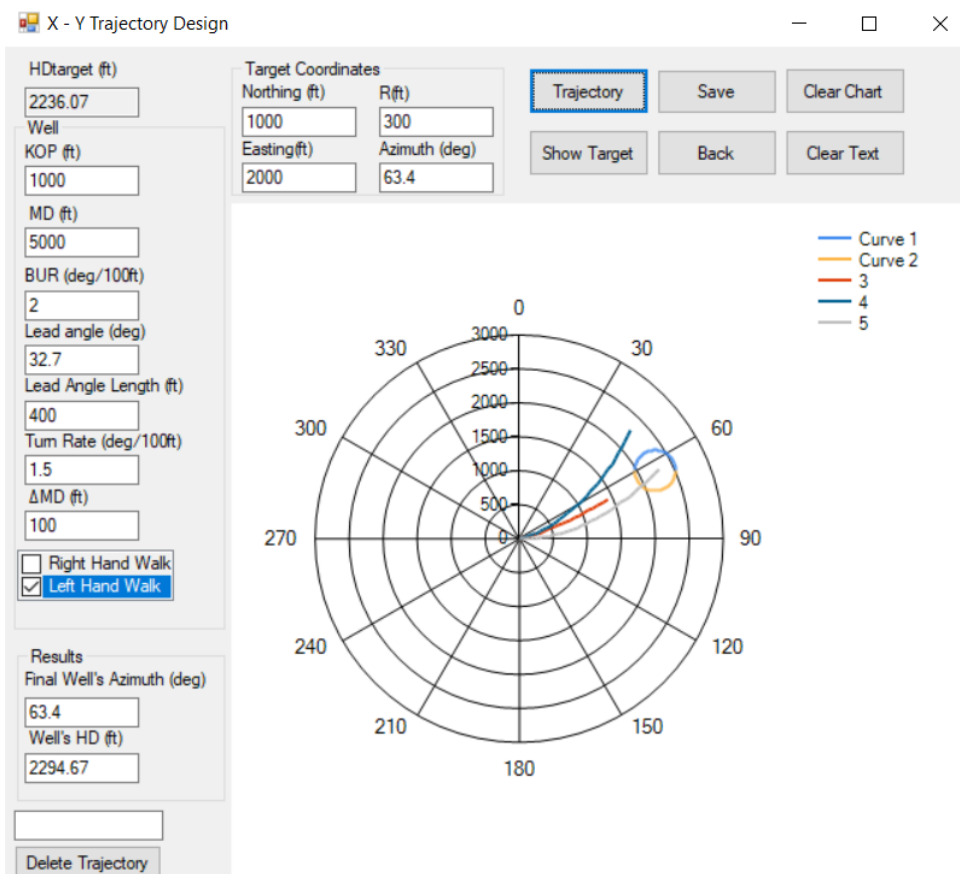
Επιπλέον επιλέγεται νέος αυξημένος ρυθμός μεταβολής του αζιμούθιου έτσι ώστε να αλλάξει η γωνία προσβολής του στόχου, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ίδιες:

- ❖ Turn Rate = 1,5 deg/100ft

Ως γωνία προσβολής ορίζεται η γωνία με την οποία η γεώτρηση προσεγγίζει τον στόχο, επί του οριζοντίου επιπέδου X-Y, σε σχέση με το αζιμούθιο του στόχου. Επιπλέον οι υπόλοιπες παράμετροι (KOP, BUR, Lead Angle, Lead Angle Length, ΔMD) δε

μεταβλήθηκαν για τον σχεδιασμό της 2^{ης} τροχιάς Τα αποτελέσματα φαίνονται στην καμπύλη 4 (μπλε) (Εικόνα 4.16) όπου αυτή χαρακτηρίζεται από:

- ❖ Τελικό αζιμούθιο, Final Well's Azimuth = 45.7 deg
- ❖ Οριζόντια μετατόπιση, Well's HD = 2294 ft



Εικόνα 4.16 : Εναλλακτικές διαδρομές προσέγγισης του στόχου

Παρατηρούμε πως για την νέα καμπύλη (4) (μπλε) Εικόνα 4.16 η οριζόντια μετατόπιση της γεώτρησης (2294 ft) δεν έχει σημαντική διαφορά με την οριζόντια μετατόπιση του στόχου (2236 ft). Ωστόσο η νέα γεώτρηση αποτυγχάνει να προσεγγίσει τον στόχο ως προς το αζιμούθιο αφού το τελικό αζιμούθιο της γεώτρησης είναι 45.7 (deg) ενώ το αζιμούθιο του στόχου είναι 63.4 (deg), διαφορά 17,7 (deg).

3^η Τροχιά

Για να προσεγγιστεί ο στόχος και ως προς το αζιμούθιο θα μεταβληθεί η γωνία οδήγησης της 2^{ης} τροχιάς (καμπύλη 4, μπλε) εικόνα 4.16 κατά 17,7 μοίρες και έτσι θα προκύψει η καμπύλη 5 (γκρι) της Εικόνας 4.16 η οποία προσεγγίζει ακριβώς τον στόχο και χαρακτηρίζεται από:

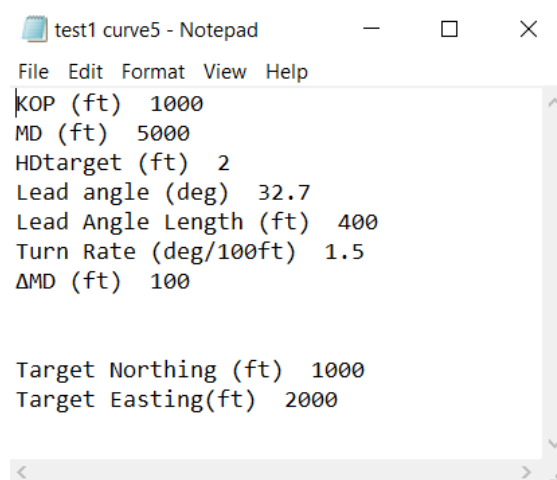
❖ Τελικό αζιμούθιο, Final Well's Azimuth = 63.4 deg

Οριζόντια μετατόπιση, Well's HD = 2294 ft

Συμπερασματικά, το πρόγραμμα είναι ικανό να υπολογίσει τις οριζόντιες προβολές διαφορετικών τροχιών, και να τις προβάλει με τέτοιο τρόπο, σε διάγραμμα τύπου polar, ώστε να μπορούν να συγκριθούν και να μελετηθούν εύκολα. Με τη διαδικασία δοκιμής και σφάλματος ο χρήστης σταδιακά οδηγείται στις παραμέτρους της τροχιάς που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του αποκτώντας καλύτερη αντίληψη για το πώς επιδρά κάθε μία απ αυτές στην πορεία της γεώτρησης

4.5.2. Πρόσθετες δυνατότητες

Τέλος το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για την αποτύπωση κάθε επιθυμητής τροχιάς σε αρχείο μορφής «txt», το οποίο έχει την μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 4.17



```
test1 curve5 - Notepad
File Edit Format View Help
KOP (ft) 1000
MD (ft) 5000
HDtarget (ft) 2
Lead angle (deg) 32.7
Lead Angle Length (ft) 400
Turn Rate (deg/100ft) 1.5
ΔMD (ft) 100

Target Northing (ft) 1000
Target Easting(ft) 2000
```

Εικόνα 4.17 : Αρχείο «txt» που περιέχει τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την οριζόντια προβολή της τροχιάς (περίπτωση καμπύλης 5 Εικόνα 4.16)

4.5.3. Παρατηρήσεις

Είναι σημαντικό να δίνεται προσοχή στον συνδυασμό των τιμών του ρυθμού αύξησης καμπυλότητας (BUR) και του μήκους του τμήματος που έχει σταθερό αζιμούθιο Lead Angle Length καθώς ο χρήστης εύκολα μπορεί να οδηγηθεί σε αποτελέσματα που δεν έχουν φυσική σημασία. Για παράδειγμα, αν το μήκος του τμήματος που ορύσσεται με σταθερό αζιμούθιο και ο ρυθμός αύξησης γωνίας κλίσης του λάβουν ακραίες τιμές θα προκύψει ένα τμήμα που θα έχει διαγράψει γωνία που θα ξεπερνά τις 90° και θα

κατευθύνεται δηλαδή προς την επιφάνεια. Σε περίπτωση επομένως που ξεπερνώνται οι 90° γωνίας παρέκκλισης από την κατακόρυφο το πρόγραμμα θα ειδοποιεί τον χρήστη με σχετικό μήνυμα καθώς ένα τέτοιο λάθος δεν είναι εύκολα εντοπίσιμο με την παρατήρηση της τροχιάς σε κάτοψη.

4.5.4. Εφαρμογή 2

Η εφαρμογή 2 έχει σκοπό να αναδείξει τη σημασία των παραμέτρων ρυθμού μεταβολής αζιμούθιου (Turn Rate) και ρυθμού αύξησης γωνίας κλίσης (BUR) και τον τρόπο που η μεταβολή τους επηρεάζει την τροχιά της γεώτρησης. Το «όριο ανοχής προσέγγισης του στόχου» δίνεται από τις εξής τιμές :

- ❖ Northing = 1000ft
- ❖ Easting = 2000ft
- ❖ R = 300ft

Από το πρόγραμμα υπολογίστηκαν το αζιμούθιο και η οριζόντια μετατόπιση του στόχου:

- ❖ Azimuth = 63.4 deg
- ❖ HD_{target} = 2236ft

Οι αρχικές παράμετροι που επιλέγονται για να ορίσουν την πορεία της γεώτρησης τίθενται ως ακολούθως:

- ❖ Βάθος πρώτης παρέκκλισης, KOP = 1000 ft
- ❖ Ολικό μετρούμενο βάθος, MD = 5000 ft
- ❖ Ρυθμός αύξησης γωνίας κλίσης Build up Rate, BUR= 2 deg/100ft
- ❖ Γωνία οδήγησης του κοπτικού, Lead Angle = 33.4 deg
- ❖ Μήκος τμήματος σταθερού αζιμούθιου, Lead angle Length = 400 ft
- ❖ Αρχικός Ρυθμός μεταβολής αζιμούθιου, Turn Rate = 0 deg/100ft
- ❖ Βήμα ΔMD= 100 ft

Περίπτωση 1

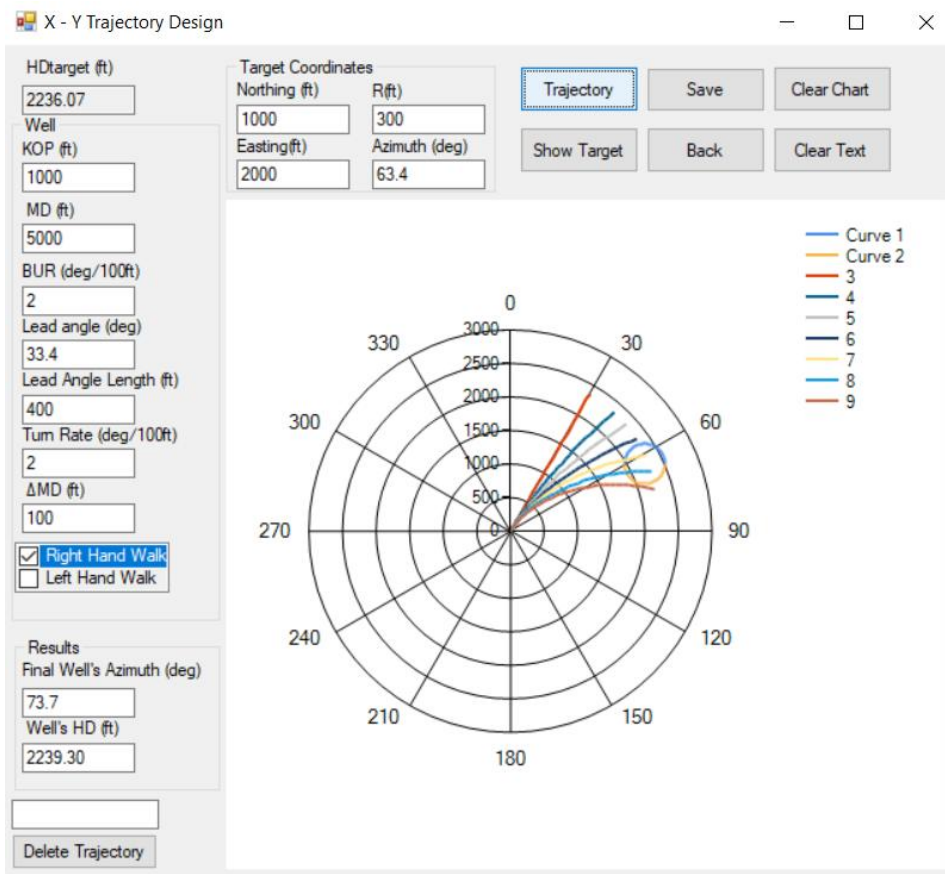
Το πρόβλημα επιλύθηκε 7 φορές με συνεχώς αυξανόμενο τον ρυθμό μεταβολής αζιμούθιου και **προέκυψαν 7 εναλλακτικές τροχιές**. Όλες οι παράμετροι παρέμειναν σταθερές σε κάθε μία εκτός του ρυθμού μεταβολής αζιμούθιου (Turn Rate). Οι τιμές που δίνονται στην παράμετρο Turn Rate καθώς και τα αποτελέσματα σχετικά με το τελικό

αζιμούθιο της γεώτρησης και την τελική οριζόντια μετατόπιση του στόχου φαίνονται στον Πίνακα 4.3. Οι τροχιές που σχεδιάζονται από το πρόγραμμα φαίνονται στην Εικόνα 4.18.

Πίνακας 4.3 Επιλογή δεδομένων και εμφάνιση αποτελεσμάτων για την περίπτωση 1

Καμπύλη	(Turn Rate) (%/100ft)	Οριζόντια Μετατόπιση (HD_{target}) (ft)	Αζιμούθιο (Azimuth)(deg)
3	0	2367	30
4	0.5	2359	40.9
5	0.8	2346	47.4
6	1.1	2328	54
7	1.4	2303	60.5
8	1.7	2274	67.1
9	2	2239	73.7

Παρατηρείται πως ο αυξανόμενος ρυθμός μεταβολής του αζιμούθιου έχει ως αποτέλεσμα ανάλογη αύξηση της γωνίας προσβολής της γεώτρησης και του τελικού αζιμούθιου της. Αρχικά, ο ρυθμός μεταβολής αζιμούθιου είναι μηδενικός και η οριζόντια προβολή της τροχιάς είναι ευθύγραμμο τμήμα. Ο αυξανόμενος ρυθμός μεταβολής αζιμούθιου συνεπάγεται την αύξηση της καμπυλότητας της τροχιάς. Αντίθετα, η οριζόντια μετατόπισή της μειώνεται με πολύ αργό ρυθμό. Έτσι οι καμπύλες 7 και 8 προσεγγίζουν με επιτυχία τον στόχο ενώ οι υπόλοιπες όχι, όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.18.



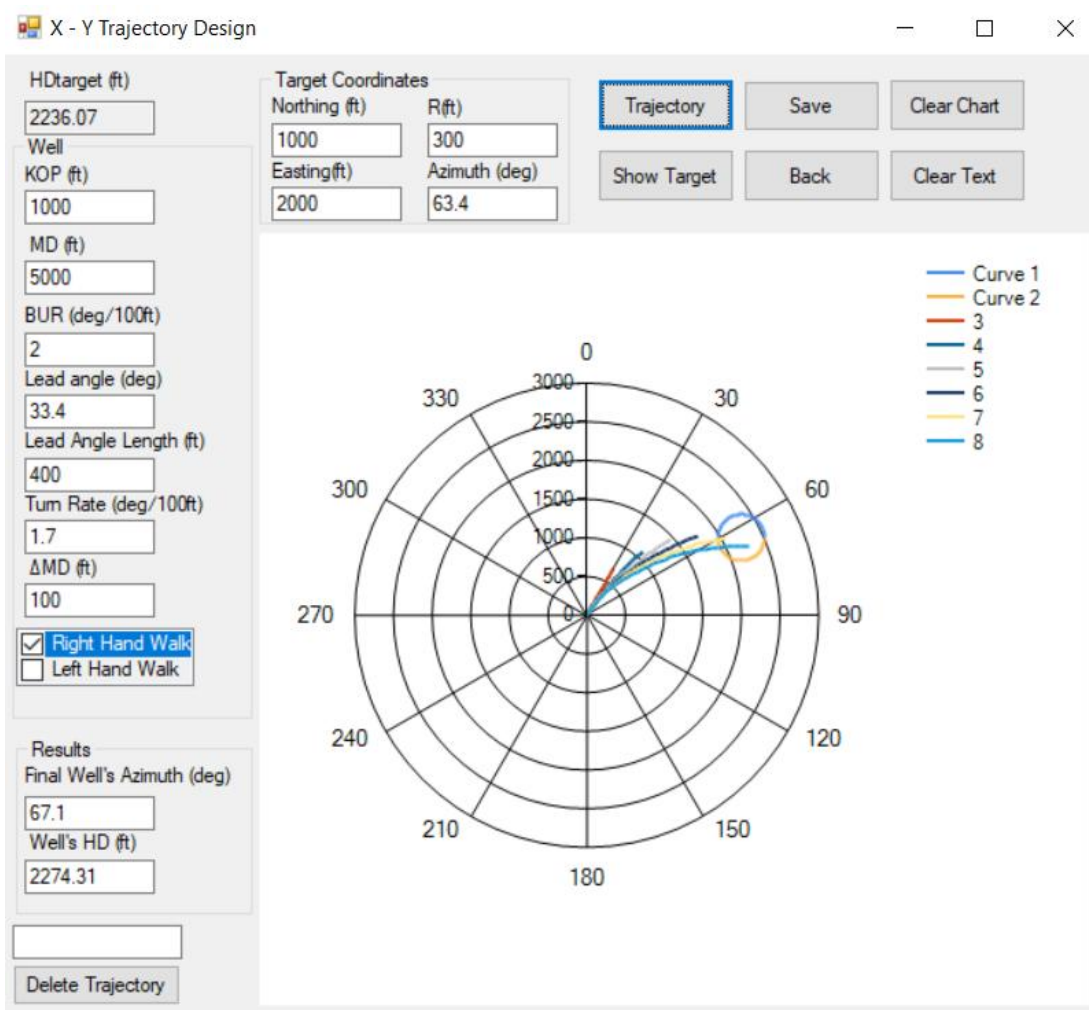
Εικόνα 4.18 : Επίδραση ρυθμού αλλαγής αζιμούθιου επί της τροχιάς της γεώτρησης

Περίπτωση 2

Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα επιλύθηκε 6 φορές, μεταβάλλονται ταυτόχρονα ο ρυθμός μεταβολής γωνίας κλίσης (BUR) και ο ρυθμός μεταβολής αζιμούθιου (Turn Rate) και προέκυψαν 6 εναλλακτικές τροχιές. Οι υπόλοιπες παράμετροι (KOP, MD, Lead Angle, Lead Angle Length, ΔMD) διατηρούνται σταθερές όπως ορίστηκαν εξ αρχής στην εφαρμογή 2. Οι τιμές που δίνονται στις παραμέτρους Turn Rate & BUR καθώς και τα αποτελέσματα σχετικά με το τελικό αζιμούθιο και την τελική οριζόντια μετατόπιση της γεώτρησης φαίνονται στον Πίνακα 4.4. Οι τροχιές που σχεδιάζονται από το πρόγραμμα φαίνονται στην Εικόνα 4.19.

Πίνακας 4.4 Επιλογή δεδομένων και εμφάνιση αποτελεσμάτων για την περίπτωση 4.5.4

Κομπύλη	Turn Rate (°/100ft)	Build up Rate (°/100ft)	Οριζόντια Μετατόπιση (HD_{target}) (ft)	Αζιμούθιο (Azimuth) (deg)
5	0	0.5	691	30
6	0.5	0.8	1084	41.3
7	0.8	1.1	1449	47.9
8	1.1	1.4	1774	54.5
9	1.4	1.7	2051	60.9
10	1.7	2	2274	67.1



Εικόνα 4.19 Τροχιές με μεταβαλλόμενους ρυθμούς γωνίας κλίσης και αζιμούθιου

Μελετώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 και την γραφική απεικόνιση τους στην Εικόνα 4.19 παρατηρείται πως σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται ραγδαία το τελικό αζιμούθιο και η οριζόντια μετατόπιση της γεώτρησης. Όπως αποδείχθηκε στην περίπτωση 1 της εφαρμογής 2 η αύξηση της παραμέτρου Turn Rate δεν επιδρά σημαντικά επί της οριζόντιας μετατόπισης της γεώτρησης. Αυτό συνεπάγεται πως η αύξηση των τιμών της παραμέτρου BUR επιφέρει αύξηση της οριζόντιας μετατόπισης της γεώτρησης. Τελικά μόνο η τροχιά 8 προσεγγίζει τον στόχο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα και προτάσεις

Οι κεκλιμένες και οριζόντιες γεωτρήσεις αποτελούν πλέον μια τεχνολογία με πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογής τόσο στην έρευνα όσο και στην εκμετάλλευση υδρογονανθράκων. Οι σημαντικές εξελίξεις στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών κυρίως στα κοπτικά άκρα, στους αυτοματισμούς και στα όργανα ελέγχου έχουν συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του κόστους αλλά και στην ασφάλεια και τεχνική αρτιότητα αυτών των έργων.

Σε κάθε περίπτωση, βασικό θέμα για την επίτευξη των παραπάνω (ασφάλεια, τεχνική αρτιότητα, κόστος) είναι ο αναλυτικός σχεδιασμός ενός γεωτρητικού έργου και η διερεύνηση όλων των κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν την εκτέλεσή του. Ταυτόχρονα, κρίσιμη συνιστώσα είναι και η συστηματική παρακολούθηση της εκτέλεσης του έργου στην πράξη και η άμεση παρέμβαση για διορθωτικές ενέργειες και την αποφυγή προβλημάτων.

Η χρήση υπολογιστικών και σχεδιαστικών προγραμμάτων αποτελεί σοβαρό εργαλείο για το μηχανικό τόσο στη φάση του σχεδιασμού όσο και κατά τη φάση της διάτρησης.

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα (κώδικας) το οποίο καλύπτει:

- ❖ Το δισδιάστατο σχεδιασμό της τροχιάς γεωτρήσεων τύπου Build & Hold
- ❖ Τη δισδιάστατη αποτύπωση της τροχιάς γεωτρήσεων τύπου Build & Hold στο κατακόρυφο και το οριζόντιο επίπεδο
- ❖ Την αξιολόγηση δυνητικών εναλλακτικών διαδρομών (paths) με μεταβαλλόμενο αζιμούθιο για την προσέγγιση ενός οριοθετημένου στόχου
- ❖ Τον έλεγχο της τροχιάς μιας ορυσσόμενης στην πράξη γεώτρησης σχετικά με την ικανοποίηση των γωνιακών συνθηκών υπό τις οποίες επιβάλλεται η είσοδος της γεώτρησης εντός του στόχου και το βαθμό απόκλισής της από τα τεθέντα χωρικά όριά του.
- ❖ Τον προσδιορισμό της πραγματικής τροχιάς γεωτρήσεων Build & Hold κατά τη φάση της διάτρησης με βάση δεδομένα μετρήσεων σε σημεία (σταθμούς), τον έλεγχο της ορυσσόμενης γεώτρησης σε σχέση με την σχεδιασθείσα και την

έγκαιρη ρύθμιση της ορυσσόμενης γεώτρησης με στόχο την άμβλυνση τεχνικών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν στην πράξη

Η ανάπτυξη του κώδικα βασίστηκε στη θεωρητική ανάλυση του σχεδιασμού τέτοιου τύπου γεωτρήσεων. Η μέθοδος της ελάχιστης καμπυλότητας χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της πραγματικής τροχιάς κατά τη διάτρηση δεδομένης της μεγαλύτερης ακρίβειάς της.

Είναι πολύ σημαντικός ο συνδυασμός αυτός γιατί δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να επανεξετάζει την σχεδιασθείσα τροχιά σε σχέση με την πραγματική και να προβαίνει σε διορθώσεις που μπορούν να γίνονται σε άμεσο χρόνο. Έτσι αποφεύγεται η δημιουργία μεγάλης έντασης προβλημάτων σε αποκλίσεις που δεν είναι εύκολη η επαναφορά της τροχιάς στην προκαθορισμένη πορεία, ώστε να προσεγγιστεί ο στόχος με ακρίβεια ως προς το αζιμούθιο, την γωνία κλίσης και την θέση του.

Ποιο συγκεκριμένα:

- ❖ Αναπτύχθηκε υπολογιστικό «εργαλείο» που σχεδιάζει αποτελεσματικά και με ακρίβεια την τροχιά μιας γεώτρησης τύπου Build & Hold δίνοντας στον χρήστη τη δυνατότητα να γνωρίζει τις συντεταγμένες κάθε σημείου της τροχιάς καθώς και άλλες παραμέτρους, για τις οποίες ο μαθηματικός υπολογισμός τους χωρίς τη βοήθεια υπολογιστή θα ήταν χρονοβόρος.
- ❖ Υπολογίζεται και αποτυπώνεται γραφικά η προβολή μιας τροχιάς τόσο στο κατακόρυφο, όσο και στο οριζόντιο επίπεδο. Η λειτουργία αυτή παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να διερευνά και να αξιολογεί εναλλακτικές προκύπτουσες λύσεις για την προσέγγιση ενός στόχου εντός των «ορίων ανοχής» που τίθενται. Επίσης παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέγει εκείνος τον τρόπο (μέσω της μεταβολής του αζιμούθιου ή της κλίσης) την πορεία οδήγησης της τροχιάς προς τον στόχο.
- ❖ Αναφορικά με την παρακολούθηση της τροχιάς της γεώτρησης κατά τη διάτρηση, το πρόγραμμα είναι ικανό να διαχειρίζεται τόσο τα δεδομένα μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών μετρήσεων, όσο και τα δεδομένα στο σύνολο των σταθμών. Σε κάθε περίπτωση, υπολογίζονται οι πραγματικές συντεταγμένες κάθε σημείου της τροχιάς της γεώτρησης, αναπαριστάται γραφικά η εξέλιξη της τροχιάς σε πραγματικό χρόνο και επιπλέον υπολογίζονται κρίσιμες παράμετροι, όπως η ένταση της γωνίας «Dog leg» μέσω της μεθόδου της ελαχίστης καμπυλότητας

(Minimum Curvature Method) για τον εντοπισμό τεχνικών προβληματικών έντονων αλλαγών στην κλίση ή το αζιμούθιο.

- ❖ Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε είναι φιλικό στον χειρισμό και ικανό να επιλύσει πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς ταχύτατα. Θα μπορούσε να είναι κατάλληλο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς καθώς δίνει στον χρήστη μία πρώτη εμπειρία σχετικά με τον σχεδιασμό γεωτρήσεων και έμμεσα βοηθά στην κατανόηση βασικών μεγεθών και παραμέτρων. Ωστόσο, τα αποτελέσματα πρέπει πάντα να αξιολογούνται με βάση τη θεωρία για να επιβεβαιώνεται η ορθότητά τους.

Για την ολοκλήρωση και την ενίσχυση της χρηστικότητας του προγράμματος, προτείνεται η συνέχιση της εργασίας με σκοπό να καλυφθούν θέματα όπως:

- ❖ Ο σχεδιασμός και άλλων τύπων (μορφών) τροχιάς, όπως για παράδειγμα της τροχιάς τύπου S.
- ❖ Εισαγωγή περισσότερων παραμέτρων προς μεταβολή από τον χρήστη κυρίως στη φόρμα σχεδιασμού της οριζόντιας προβολής της τροχιάς, για παράδειγμα το αζιμούθιο προσβολής του στόχου. Για τον σκοπό, θα έπρεπε το πρόβλημα προσδιορισμού της τροχιάς να επιλυθεί εξ αρχής με άγνωστο προς υπολογισμό την γωνία οδήγησης.
- ❖ Την τρισδιάστατη απεικόνιση της γεώτρησης που θα συνέβαλε σε μία πιο ολοκληρωμένη φόρμα υπολογισμού της πραγματικής τροχιάς. Ωστόσο, το προγραμματιστικό περιβάλλον της Visual Studio δεν παρέχει τη δυνατότητα αναπαραγωγής τρισδιάστατων διαγραμμάτων.
- ❖ Την δυνατότητα για οριζόντια προβολή της πραγματικής και της σχεδιασθείσας τροχιάς στο ίδιο διάγραμμα, καθώς και την δυνατότητα εύρεσης κάθε σημείου της πραγματικής τροχιάς και όχι μόνο των σημείων των μετρήσεων.
- ❖ Τέλος για λόγους βελτίωσης και πληρότητας της φόρμας επεξεργασίας δεδομένων μετρήσεων, θα ήταν σκόπιμο να ενσωματωθούν όλες οι μέθοδοι υπολογισμού της πραγματικής τροχιάς της γεώτρησης για την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Biltayib, B. M., Damrah, S., Al-Fakeh, B., & Al-Kanderi, A. (2015.). *Validation of Directional Drilling Well Design Trajectory with a Case Study in Kuwait*. Australian College of Kuwait.
- Bourgoyne Jr., A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young Jr., F. S. (1991). *Applied Drilling Engineering*. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers.
- Carden, R. S., & Grace, R. D. (2007). *HORIZONTAL AND DIRECTIONAL DRILLING*. Tulsa, Oklahoma, USA: PETROSKILLS OGCI.
- Farah, F. O. (2013). *DIRECTIONAL WELL DESIGN, TRAJECTORY AND SURVEY CALCULATIONS, WITH A CASE STUDY IN FIALE, ASAL RIFT, DJIBOUTI*.
- Ford, J. (2017). *Drilling Engineering G11DE*.
- Hossain. (2015).
- Hossain, E. M., & Al-Majed, A. A. (2015). *Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering*. Beverly: Scrivener Publishing.
- Inglish, T. A. (1987). *Directional Drilling* (Τόμ. 2). London: Graham & Trotman .
- Mitchell, B. (1995). *Oil Well Drilling Engineering* (10th Edition εκδ.). USA: MITCHEL ENGINEERING.
- Mitchell, R. F., & Misca, S. Z. (2011). *FUNDAMENTALS OF DRILLING ENGINEERING*. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers.
- Musa, M. A., Ahmed, M. M., & Yusuf, M. A. (2015). *Computer Program for Directional Drilling Design*. University of Khartoum.
- Petrowiki*. (n.d.). Ανάκτηση από <http://petrowiki.org>
- Rabia, H. (2002). *Well Engineering & Construction*. Entract Consulting.
- Rabia, H. (2002). *Well Engineering and Construction*.
- Stamatakis, S., Dimitrellou, E., & Konstantakopoulos, I. (2003). *Τεχνολογία Γεωτρήσεων*. Αθήνα.

