

**UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
RUDARSKI FAKULTET
PRIJEDOR**

**Igor Topić
TEORIJSKI ASPEKTI TEHNIKE I TEHNOLOGIJE IZRADE
DIRIGOVANIH UŠOTINA**

završni rad

Prijedor, jun 2024.

**Tema: TEORIJSKI ASPEKTI TEHNIKE I TEHNOLOGIJE
IZRADE DIRIGOVANIH UŠOTINA**

Ključne reči:

dirigovano

ugao

azimut

Komisija: _____ , predsednik

doc. dr Miroslav Crnogorac, mentor

_____ , član

Kandidat:

Igor Topić

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	TEHNIKA I TEHNOLOGIJA BUŠENJA KOSO-USMERENIH BUŠOTINA	3
3	KOSO-USMERENO BUŠENJE	7
3.1	Izbor oblika (tipa) putanje koso-usmerenih bušotina	7
3.1.1	Jednokanalne koso-usmerene bušotine	8
3.1.2	Višekanalne koso-usmerene bušotine	12
3.2	Projektovanje koso-usmerenih bušotina	16
3.2.1	Projektovanje putanje formiranja i održavanja ugla odklona	18
3.2.2	Projektovanje putanje formiranja-održavanja i obaranja ugla odklona (profil tipa "S")	21
3.2.3	Projektovanje putanje kontinuiranog građenja ugla odklona (profil tipa "J")	24
3.3	Alati za bušenje koso-usmerenih bušotina	25
3.3.1	Klinovi za skretanje	26
3.3.2	Dubinski motori sa kosim prelazom	32
3.3.3	Rotaconi upravljivi sistem – RSS (Rotary Steerable System)	33
3.3.4	Ostali alati za ditigovano bušenje	36
4	MERNI INSTRUMENTI	42
5	TEHNIKA I TEHNOLOGIJA BUŠENJA HORIZONTALNIH BUŠOTINA ..	46
5.1	Projektovanje horizontalnih bušotina	49
5.1.1	Vrste i tipovi horizontalnih bušotina	49
5.2	Profili horizontalnih bušotina	53
5.2.1	Profili jednokanalnih horizontalnih bušotina	53
5.2.2	Profili višekanalnih horizontalnih bušotina	56
5.3	Proračun trajektorije horizontalne bušotine	62
5.4	Izrada i sklopovi bušačkog pribora horizontalnih bušotina	65
5.4.1	Izrada i sklopovi za bušenje bušotina veoma malih radijusa	66

5.4.2	Izrada i sklopovi za bušenje bušotina malih radijusa.....	67
5.4.3	Izrada i sklopovi za bušenje bušotina srednjih radijusa.....	69
5.4.4	Izrada i sklopovi za bušenje bušotina velikih radijusa.....	71
5.4.5	Dozvoljene dužine pribora u zakrivljenom kanalu bušotine	73
5.5	Uređaj za kontrolno merenje u procesu izrade bušotine	74
5.6	Ispiranje horizontalnih bušotina	79
5.7	Konstrukcija horizontalnih bušotina.....	85
5.7.1	Prečnici dleta.....	85
5.7.2	Ugradnja zaštitnih cevi u kanal bušotine	86
5.8	Cementacija horizontalnih bušotina	92
6	ZAKLJUČAK	95
	LITERATURA	97

1 UVOD

Tehnologija dirigovanog (usmerenog) bušenja, opremanja i osvajanja dirigovanih bušotina predstavlja najznačajnije unapređenje tehnologije u oblasti naftnog rudarstva kakvog nije bilo još od vremena uvođenja tzv. "rotari" bušenja u naftnoj privredi.

Bušenje dirigovanih bušotina podrazumeva da kanal bušotine bude uspešno izrađen, a da pri tome ugao i azimut budu u okviru planiranih vrednosti.

Brzina bušenja dirigovanih bušotina je razvojem savremenih tehnologija gotovo izjednačena sa brzinom bušenja vertikalnih bušotina.

Iz godine u godinu se povećava potreba za izvođenjem dirigovanih bušotina, posebno prilikom razrade ležišta koja su pozicionirana ispod vodenih površina, kao što je more, pa je ovo postala uobičajena pojava prilikom bušenja. U zavisnosti od cilja bušotine, ugla i azimuta kanala bušotine, tehnike i tehnologije izrade dirigovanih bušotina mogu se podeliti na:

- Tehniku i tehnologiju izrade koso-usmerenih bušotina,
- Tehniku i tehnologiju izrade horizontalnih bušotina.

Za razliku od klasičnog (vertikalnog) bušenja, primena dirigovanog bušenja kao relativno nove tehnologije u procesu razrade ležišta ugljovodonika, otvorila je nove mogućnosti za povećanje efektivnosti istraživanja i bolje iskorišćenje ležišta nafte, gasa i termalnih voda. Usmerene bušotine su tehnički daleko složenije i skuplje za izradu od vertikalnih bušotina. Međutim, primena ove tehnologije bušenja je ekonomski opravdana jer se postiže znatno veća produktivnost.

Namera ovog diplomskog rada je da se na osnovu podataka iz literature sagledaju savremena dostignuća tehnike i tehnologije izrade dirigovanih bušotina kao preduslova za uspešnost, racionalizaciju i ekonomičnost istraživanja i eksploatacije ležišta nafte, gasa i podzemnih voda.

U radu je detaljno, koliko je to u ovom obimu moguće obuhvatiti, prikazan izbor tipa i oblika profila bušotina, osobenosti sastava kompozicije bušačkog alata, kao i izbor i delovanje sklopa za vođenje iskrivljenog i horizontalnog kanala bušotine u procesu

bušenja, zatim sastav za merenje u tim delovima kanala bušotine. Razmotrene su osobenosti ispiranja iskrivljenih I horizontalnih delova kanala bušotine kao i odgovarajući režim ispiranja. Prikazana je konstrukcija horizontalnih bušotina, ugradnja kolone zaštitnih cevi i cementacija te kolone.

2 TEHNIKA I TEHNOLOGIJA BUŠENJA KOSO-USMERENIH BUŠOTINA

U procesu bušenja kod istraživanja i eksploatacije ležišta nafte, gasa i podzemnih voda, naročito dubokih bušotina, može doći do odstupanja od projektovanog pravca kanala bušotine u vertikalnoj i horizontalnoj ravni. Pri tome se menja ugao pada i azimuta, pa trajektorija bušotine zadobija karakter krive. Promena pravca ose bušotine u prostoru u odnosu na projektovani pravac naziva se krivljenje (devijacija) bušotine koje može biti neplanirano (nenamerno) i planirano (namerno).

Nenamerno krivljenje bušotine nastaje usled geološko-tehničkih faktora.

Planirano krivljenje bušotine izvodi se pomoću tehničkih sredstava i tehnoloških metoda, i naziva se usmereno bušenje. Pri usmerenom bušenju, po projektovanom pravcu mora se uzimati u obzir i neplanirano krivljenje koje može nastati u procesu usmerenog bušenja.

Neplanske devijacije bušotine dovode do značajnih grešaka pri određivanju moćnosti i elemenata zaleganja slojeva kroz koje se buši, narušava se istražna mreža, smanjuje tačnost podataka istraživanja, povećavaju greške pri razradi i eksploataciji ležišta. Dolazi do drastično većeg habanja bušaćih šipki uzrokovanog trenjem alata o zid iskrivljenog kanala bušotine, dolazi do povećanja potrošnje energije, broj havarija i otežava se njihova likvidacija; onemogućeno, ili znatno otežano spuštanje zaštitnih cevi u kanal bušotine, povećava se mogućnost gnječenja kolone zaštitnih cevi na mestima krivljenja kanala bušotine; otežana je cementacija zaštitne kolone usled naleganja zaštitnih cevi na zid kanala bušotine, zbog čega se neravnomerno popunjava prstenasti prostor cementnim rastvorom; povećava se broj inklinometrijskih merenja u kanalu bušotine uz otežano izvođenje tih radova (Steiner, 1994).

Na karakter i intenzitet krivljenja bušotine utiču sledeći uzroci:

- geološki,
- tehnički i
- tehnološki.

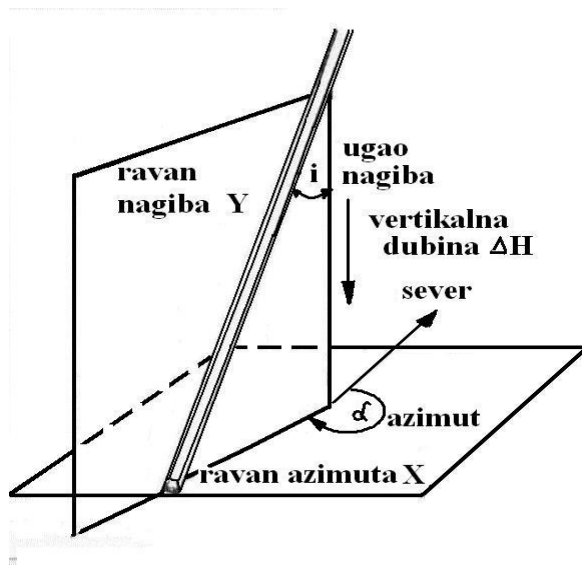
Pri pravilnom povezivanju tehnoloških parametara režima bušenja smanjuje se vreme dejstva ukupnog kompleksa geoloških, tehničkih i tehnoloških uticaja na krivljenje bušotine.

Negativne posledice krivljenja bušotine odražavaju se i u fazi eksploatacije bušotine (prevremene havarije dubinske pumpe, brzo habanje eksploatacione kolone). Krivljenje bušotine usled uticaja geoloških, tehničkih i tehnoloških faktora nemoguće je u potpunosti otkloniti, pogotovu što oni dejstvuju neprekidno, u toku procesa bušenja, i po celoj dužini bušotine, ali se može kontrolisati.

Usmereno krivljenje bušotine omogućava bušenje po najracionalnijim profilima i rešava geološke, tehničke i eksploatacione zadatke sa povećanom ekonomskom efektivnošću. Osim toga, poboljšava se kvalitet istražno eksploatacionih radova, koji se obično projektuju po pravilno utvrđenoj mreži, dobijaju se podaci veće tačnosti za moćnost i zaleganje produktivnog sloja, povećava se procenat jezgra, kada se buši sa jezgrovanjem, povećava se ekonomičnost bušenja na račun smanjenja metraže bušenja, montažno demontažnih radova i transporta bušaćih garnitura.

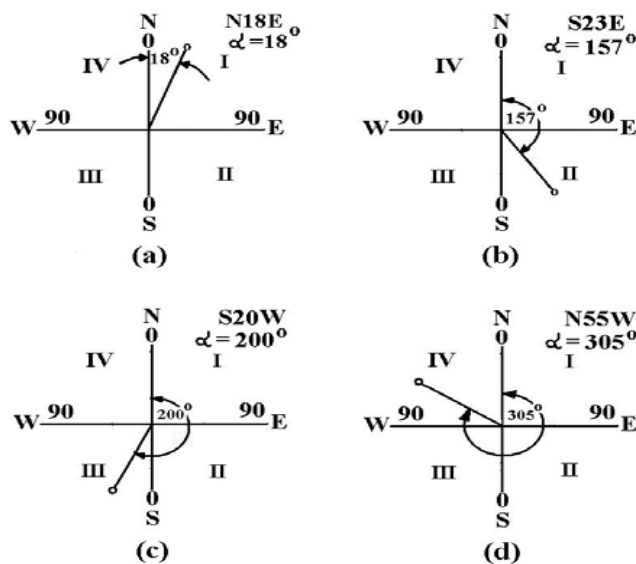
U procesu bušenja dleto se, osim vertikalno, kreće kako po vertikalnoj, tako i po horizontalnoj ravni, pa se ovo kretanje može predstaviti uz pomoć "X-Y" ravni (slika 2.1).

Ravan smer se označava sa "X", a ravan nagiba sa "Y". Uglovi koji definišu smer ili azimut bušotine predstavljaju odstupanje od pravca severa, a uglovi otklona kanala bušotine u zamišljenoj vertikalnoj ravni, uglovi odstupanja. Za uglove nagiba se koristi i naziv zenitni uglovi.



Slika 2.1 - Elementi prostornog položaja kanala bušotine (Bizjak 2004)

Odstupanja ugla i azimuta u horizontalnoj ravni se određuju se uz pomoć 90° kvadratne šeme (slika 2.2). U ovoj šemi, uglovi se uvek čitaju od severa ka istoku ili zapadu, i od juga ka istoku ili zapadu. U praksi, azimut se može prikazati i alternativno, samo očitavanjem od pravca severa (N). Priraštaj zenitnog ugla ili azimuta na jedinicu dužine određenog intervala kanala bušotine predstavlja intenzitet azimuta i zenitnog ugla krivljenja (Bizjak 2004).



Slika 2.2 - 90° kvadratna šema azimuta (Hrković, 2002)

Položaj kanala bušotine u prostoru ne može biti precizno određen sve dok se nagib i azimut u bilo kojoj tački kanala bušotine ne utvrde. To implicira neophodnost poznavanja ovih vrednosti u što kraćim razmacima. Radi što lakše interpretacije kretanja kanala bušotine, pretpostavlja se da je razdaljina između dva merenja pravolinijska. U zavisnosti od konkretnih okolnosti, merenja se izvršavaju nakon svakih 10 do 50 metara, gde je uobičajeno da se uglovi mere na svakih izbušenih 30 metara (Hrković & Lazić, monografija).

3 KOSO-USMERENO BUŠENJE

Osavremenjavanje tehnike i tehnologije koso-usmerenog bušenja predstavlja jedno od važnijih dostignuća naučno-tehničkog progressa u oblasti bušenja, jer koso-usmereno bušenje zahteva primenu posebno razvijene tehnike, koja omogućava smanjenje obima radova u procesu bušenja. Na taj način mogu se postići značajni pozitivni ekonomski efekti, odnosno uštede pri istraživanjima i eksploataciji ležišta nafte, gasa i podzemnih voda.

Kontrolisano koso-usmereno bušenje se primenjuje u sledećim situacijama:

- bušenje iz dostupne prema manje dostupnoj lokaciji;
- bušenje u urbanim (naseljenim) sredinama;
- bušenje ispod površine mora;
- havarijski uslovi – kada nije moguće izvršiti instrumentaciju alata, potrebno je zaobići zaglavljn alat;
- korekcija elemenata trajektorije;
- otvaranje novog produktivnog sloja kada je trenutni iscrpljen i nema produktivnost;
- za potrebe stavljanja pod kontrolu bušotine koja eruptira i ne može da se kontroliše.

Metodika primene koso-usmerenog bušenja uključuje rešenja sledećih zadataka:

- Izbor trajektorije (oblika) koso-usmerene bušotine,
- Projektovanje koso-usmerenih bušotina,
- Izbor alata za koso-usmereno bušenje.

3.1 Izbor oblika (tipa) putanje koso-usmerenih bušotina

U odnosu na broj kanala koso-usmerene bušotine mogu biti:

- jednokanalne ili
- višekanalne.

3.1.1 Jednokanalne koso-usmerene bušotine

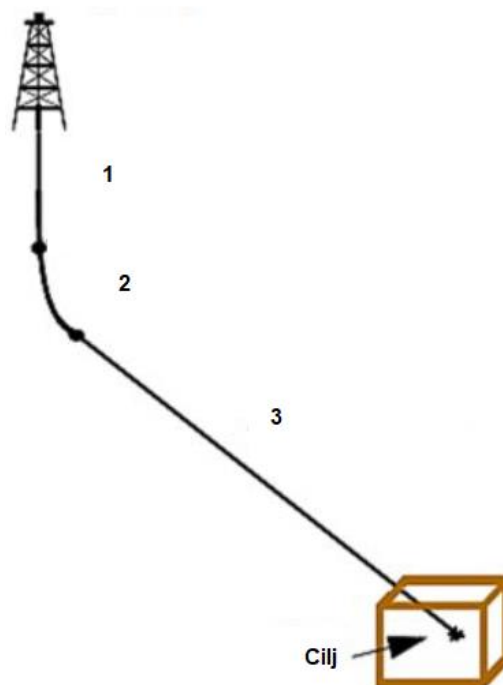
Jednokanalne koso-usmerene bušotine su specijalno planirane dirigovane bušotine sa jednim kanalom, koji polazi od jedne tačke sa površine, a po definisanoj, projektovanoj trajektoriji završavaju u određenoj tački udaljenoj od vertikalne projekcije ulaza.

Kod jednokanalnih koso-usmerenih bušotina projektovanih u ravni, gornji deo kanala bušotine je vertikalni, a donji deo se usmerava pod različitim uglovima pada.

Prilikom planiranja koso-usmerenih bušotina je najvažniji izbor trajektorije kanala bušotine. Tri osnovna tipa putanje kanala bušotine koja se koriste zajedno sa jednom modifikovanom putanjom su:

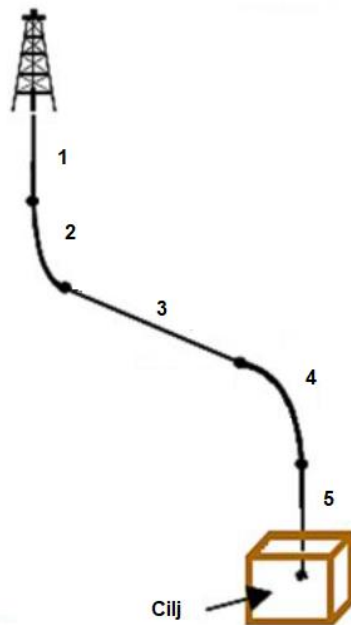
- sekcija formiranja i održavanja ugla otklona;
- sekcija građenja, tj. održavanja i obaranja ugla;
- sekcija kontinuiranog građenja ugla otklona;
- sekcije građenja, tj. održavanja, obaranja i/ili održavanja obaranja ugla.

Putanja koja se koristi za građenje ugla od 0 stepeni do željene vrednosti zadržavajući taj ugao sve do postizanja konačnog cilja, poznata je kao putanja formiranja i održavanja nagiba. U ovom scenariju, ugao koji se koristi za postizanje konačnog cilja jednak je maksimalnom uglu otklona dostignutom tokom podizanja putanje. Osim toga, ovaj tip putanje zahteva minimalna odstupanja od vertikale kako bi se postigao željeni cilj. Najčešće se primenjuje kod bušenja kada treba da se postigne maksimalni horizontalni otklon dna kanala bušotine u odnosu na ulaz bušotine, kao i bušenje "grmova". Sastoji se iz vertikalnog dela krivolinijskog dela i pravolinijskog dela (slika 3.1). Ovaj tip trajektorije se još naziva i tangencijalni tip.



Slika 3.1 - Tangencijalni tip putanje koso-smerene bušotine: 1) vertikalni deo, 2) krivolinijski deo i 3) pravolinijski deo

Kada putanja građenja, održavanja i obaranja ugla otklona ima približni oblik latiničkog slova "S", tada se ovaj tip trajektorije naziva trajektorijom tipa "S". Profil je sastavljen iz: vertikalnog dela, početnog krivolinijskog dela sa podizanjem zenitnog ugla u cilju povećanja otklona, pravolinijskog dela za održavanje projektovanog otklona dna bušotine od vertikale, drugog krivolinijskog dela sa obaranjem ugla za održavanje postignutog otklona i vertikalnog dela kojim se preseca produktivni sloj.

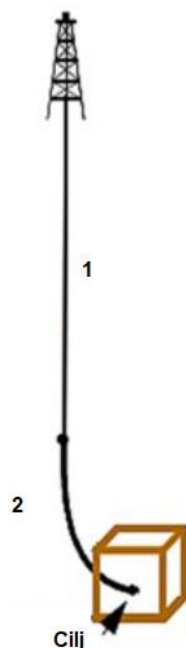


Slika 3.2 - Putanja kanala koso-usmerene bušotine tipa "S": 1) početni vertikalni deo, 2) krivolinijski deo, 3) pravolinijski deo, 4) drugi krivolinijski deo i 5) vertikalni deo

Ovakav oblik kanala bušotine ima veće vrednosti uglova otklona od vertikale, za razliku od onog gde se gradi i održava ugao otklona. Putanja tipa "S" najčešće se primenjuje pri bušenju dubokih jednokanalnih koso-usmerenih bušotina (preko 5000 m), za eksploataciju višeslojnih ležišta. Pri tome, produktivni sloj se preseca vertikalno (slika 3.2).

Željeni cilj se postiže konstantnim povećavanjem ugla otklona duž putnje. Ovaj tip putanje, koji se još zove i putanja tipa "J" sastoji se iz gornjeg vertikalnog i krivolinijskog dela sa ravnomernim podizanjem zenitnog ugla (slika 3.3). Primenjuje se u cilju smanjenja pada ugla kanala bušotine na intervalu postavljanja eksploatacione opreme unutar bušotine (dubinske pumpe, pakeri); za presecanje produktivnog sloja koji strmo zaležu; za izradu "grmova"; u cilju maksimalnog smanjenja primene alata za izradu koso-usmerenog intervala kanala bušotine.

Ovaj tip kanala bušotine ima najveću vrednost ugla otklona od vertikale u poređenju sa ostalim tipovima putanja.



Slika 3.3 - Putanja kanala koso-usmerene bušotine tipa „J“: 1) vertikalni deo i 2) krivolinijski deo

Modifikovana "S" putanja je putanja na kojoj se gradi-održava, obara i/ili održava. Željeni cilj se postiže pod manjim uglom otklona od vertikale od maksimalnog ugla dostignutog u sekciji održavanja.

Maksimalni uglovi koji se primenjuju kod ovog tipa trajektorije imaju veće vrednosti u odnosu na trajektorije kod kojih se gradi i održava ugao otklona, ali manje od ostvarenih uglova krivom "S".

Izabrane putanje koso-usmerenih kanala bušotina treba da obezbede:

- Visok kvalitet izrade bušotina koje će predstavljati objekat za buduću eksploataciju;
- Bušenje i zaštitu kanala bušotine primenom savremenih tehnologija i tehničkih sredstava;
- Minimalne troškove na izradi bušotine;
- Mogućnost primene metode za istovremenu eksploataciju nekoliko produktivnih slojeva;

- Bušenje i zaštitu kanala bušotine bez havarija;
- Minimalno opterećenje na kuku pri operacijama podizanja ili spuštanja kolone bušaćeg pribora;
- Pouzdan rad eksploatacione opreme postavljene u kanalu bušotine;
- Slobodan prolaz pribora i uređaja kroz kanal bušotine.

Pri izboru bušotina uzima se u obzir njihova namena, geološki uslovi bušenja, zakonomernost prirodnog krivljenja, tehničke mogućnosti i ekonomski faktori.

3.1.2 Višekanalne koso-usmerene bušotine

Bušenje višekanalnih koso-usmerenih bušotina zasniva se na tome da se iz osnovnog kanala bušotine na određenoj dubini i po određenom redosledu buše novi dopunski kanali različito usmereni u prostoru.

Višekanalne bušotine izvode se po određenoj šemi za koju treba poznavati sledeće elemente:

- broj kanala,
- redosled bušenja kanala,
- međusobni razmeštaj kanala u odnosu jedan na drugi kao i u odnosu na produktivni sloj,
- dubinu i uzajamni prostorni položaj tačaka iz kojih se buši svaki dopunski kanal višekanalnih bušotina,
- Na svaki od nabrojanih obeležja utiču različiti faktori kao što su,
- strukturno-geološke karakteristike ležišta,
- moćnost i prostorni položaj produktivnog sloja,
- dubina bušotine,
- stepen istraženosti ležišta,
- gustina istražne mreže,
- azimut i zenitni ugao,
- geološke karakteristike stena krovine i podine ležišta,

- čvrstoća kolone bušaćeg pribora i dr.

Kombinacijom nabrojanih faktora konstituišu se različite tehnološke šeme višekanalnih bušotina. U savremenim uslovima može se izdvojiti više tipova profila bušotina sa različitim rasporedom dopunskih kanala.

Tehnologija izrade dopunskih kanala u procesu bušenja višekanalnih bušotina, zasniva se na sprovođenju dve osnovne operacije:

- Izrada veštačkog dna bušotine (mosta) na mestu skretanja iz osnovne bušotine (ako se skretanje ne izvodi na dnu bušotine),
- Skretanje i bušenje dopunskog kanala iz osnovnog kanala bušotine.

Pri bušenju višekanalnih bušotina za eksploataciju nafte i gasa znatno se povećavaju površine kontakta bušotine i produktivnog sloja (površina filtracije) i samim tim zona drenaže.



Slika 3.4 - Osnovni tipovi višekanalnih koso-usmerenih bušotina u procesu razrade ležišta nafte i gasa (Elyasi, 2014)

Prema obliku dopunskih kanala i po njihovom prostornom položaju višekanalne bušotine su:

- jednosmerne trase sa vertikalnim ili kosim osnovnim kanalom i dodatnim kanalima koji se buše u istom smeru (sa istim azimutom bušenja) (slika 3.4a) za bušenje kroz produktivne slojeve koji imaju strm položaj.

- dvostrane trase čiji su osnovni kanali vertikalni ili kosi kao i dodatni kanali sa dijametralno suprotnim pravcima; obično se primenjuju za razradu slojeva koji blago zaležu kao i slojeva koji se nalaze u okviru sinklinala (slika 3.4b) ili antiklinala sa strmim padom krila.

Višekanalne bušotine kod istraživanja i eksploatacije nafte, gasa, voda i termalne energije su veoma perspektivne jer se njihovom primenom omogućava rešavanje važnih zadataka medju kojima su posebno značajni:

- efektivna razrada ležišta nafte i gasa koja poseduju loše kolektorske karakteristike,
- znatno smanjenje broja bušotina neophodnih za razradu ležišta nafte i gasa,
- eksploatacija visoko viskozniht nafti sa većih dubina.

Ležišta nafte se medjusobno razlikuju po svojim geološkim karakteristikama i eksploatacionim uslovima, što je dovelo do neophodnosti razrade tipskih oblika grananja koso-usmerenih bušotina u cilju ostvarivanja maksimalnih eksploatacionih efekata u konkretnim uslovima. Na primer, u produktivnim slojevima male moćnosti i/ili pri niskim slojnim pritiscima, bilo je neophodno razraditi tehnička sredstva za naglo skretanje (krivljenje) kanala bušotine.

Teoretska istraživanja sprovedena u tom pravcu omogućila su da se dobije kvantitativna ocena efektivnosti razrađenih oblika dopunskih kanala i profila kanala bušotine u odnosu na broj kanala i njihovo pružanje u cilju postizanja optimalnih uslova eksploatacije u ravnomeno propustljivim slojevima.

Osnovni kriterijum za izbor oblika profila višekanalnih bušotina predstavljaju geološke karakteristike sredine kroz koju se buši, uslova razrade i eksploatacije, sa jedne strane i tehničkih mogućnosti na savremenom nivou, sa druge strane.

Oblici profila bušotine mogu biti veoma različiti: dopunski kanali se mogu granati na različitim visinama u odnosu na podinu produktivnog sloja; različitim medjusobnim rastojanjima i različitim radijusima krivljenja, presecajući produktivni sloj vertikalno, koso, sa blagim padom ili horizontalno duž produktivnog sloja.

Pod bušenjem "grmova" (slika 3.5), podrazumeva se metoda bušenja pri kojoj se ulaz (usta) većeg broja bušotina grupišu na ograničenoj površini. Ove bušotine se krive tako da presecaju produktivne slojeve u tačkama koje odgovaraju istražnoj mreži prema projektu razrade slojeva ležišta nafte i gasa.

"Grmovi" bušotina približno imaju oblik konusa ili piramide čiji vrh predstavlja površina sa koje se buši grm, a osnovu krug ili višougao, čije se razmere određuju veličinom mreže za razradu ležišta.

U procesu bušenja grma bušotina, znatno se smanjuju izvođački i montažno-demontažni radovi na bušenju, smanjuje se obim izrade puteva, električnih vodova, vodovoda, uprošćeno je opsluživanje eksploatacionih bušotina i skraćen transport. Najbolji efekti bušenja metodom "grmova" postižu se na razradi ležišta ispod morskog dna, jezera, močvara i dr.



Slika 3.5 - Grm bušotina (<https://energynews.us/2015/04/24/study-oil-and-gas-drilling-consuming-millions-of-acres/>)

Pri otvaranju višeslojnih ležišta broj bušotina u "grmu" se proporcionalno povećava. Minimalan broj bušotina u jednom "grmu" su dve, međutim u praksi je taj broj znatno veći. Poznati su slučajevi u svetu kada broj bušotina u grmu prelazi 60.

3.2 Projektovanje koso-usmerenih bušotina

Prilikom projektovanja koso-usmerenih bušotina, ključni fokus je na stvaranju kanala bušotine koji će biti stabilan tokom bušenja, omogućavajući uspešno sprovođenje svih planiranih operacija poput testiranja, jezgrovanja i EK merenja. Ovi principi se obično postižu primenom sledećih tehničkih metoda:

- Odabir dužine kosog kanala bušotine se vrši u skladu sa uglom nagiba između 15° i 45° . Manji uglovi mogu izazvati poteškoće u održavanju nagiba i azimuta kanala bušotine, dok veći uglovi od 45° mogu prouzrokovati probleme pri izvođenju operacija kao što su testiranje, EK merenje i sl;
- Početak skretanja kanala bušotine od vertikale treba da se izvrši na manjim dubinama kako bi se olakšalo i preciznije izvelo. Inicijalno skretanje se obično postiže korišćenjem dubinskih motora, sa ciljem postizanja ugla nagiba od 10° do 15° i određenog azimuta. Nakon postizanja ovih uglova, prelazi se na "rotaciono" usmereno bušenje kako bi se održao ili povećao ugao otklona. Povećanje ugla nagiba ili otklona se obično kreće od 2° do 4° na svakih 30 metara izbušenog kanala bušotine;
- Kod dubokih bušotina koje imaju veliku devijaciju, poželjno je zaštititi prvi i drugi interval podizanja ugla ugradnjom zaštitnih cevi. Ovo sprečava stvaranje kolena i brava u kanalu bušotine i sa tim povezane tehničke komplikacije;
- Tokom korišćenja sistema za rotaciono bušenje, osim vodećih stabilizera, neophodno je instalirati i preventivne stabilizere na svakih 27 metara. U slučaju upotrebe teških bušaćih šipki, preventivni stabilizeri se montiraju na oko 110 metara iznad njih. Ovi stabilizeri sprečavaju prijanjanje teških šipki na zidove kanala bušotine i vrše kalibraciju kanala;

- Promene u sistemu bušenja ili sastavu alata na dnu bušotine treba prilagoditi potrebi za zamenu istrošenih delova (npr. dleta), kako bi se smanjio broj manevara alatom za bušenje;
- Potrebno je detaljno analizirati slojeve kroz koje će se vršiti koso-usmereno bušenje kako bi se procenile mehaničke brzine bušenja i odredilo optimalno mesto za početak skretanja;
- U cilju efikasnog razvoja ležišta ugljovodonika i optimizacije proizvodnje, uobičajeno je postaviti "grm" bušotina, koji čine dve ili više koso-usmerenih bušotina lociranih na jednom proširenom temelju za postrojenje za bušenje (Bizjak, 2004).

U procesu projektovanja koso-usmerene bušotine, kada su poznate koordinate usta bušotine i cilja na dnu bušotine, neophodno je definisati tip trajektorije, odnosno putanje kanala bušotine, kao i konačnu vertikalnu dubinu bušotine. Takođe treba odrediti merenu dužinu bušenog kanala bušotine, horizontalno rastojanje od cilja do vertikalne linije, tj. ose bušačeg tornja, dubinu skretanja kanala bušotine, odnosno dubinu na kojoj se kreće sa fazom formiranja ugla otklona od vertikalne. Skretanje se obično izvodi u plićim zonama u kojima su formacije velike bušivosti pa je usmereno bušenje lakše i ima značajan uticaj na postignutu vrednost ugla otklona od vertikalne. Potrebno je odrediti konačno povećanje vrednosti ugla otklona od vertikalne "i" ($^{\circ}$), do konačnog cilja u kanalu bušotine, kao i povećanje ugla otklona po jedinici dužine "q" ($^{\circ}/m$). Ugao otklona obično se izražava kao promena ugla nagiba na dužini bušenja od 10m ili 30m, tj. kao ($^{\circ}/10m$) ili ($^{\circ}/30m$). Pored toga, prilikom projektovanja koso-usmerene bušotine bitno je predvideti i alate koji će se koristiti za bušenje, primenjeni režim bušenja, kao i programe za isplaku, ugradnju zaštitnih cevi, cementaciju i ostale korake (Hrković & Bizjak, 2002).

3.2.1 Projektovanje putanje formiranja i održavanja ugla otklona

Kod tangencijalnog oblika profila bušotine za proračun je izdvojen karakterističan profil koji se sastoji iz vertikalnog dela, dela početnog krivljenja i tangencijalnog dela tj. održavanja maksimalno postignutog ugla (slika 3.6).

Oznake karakterističnih tačaka:

A - Ulaz bušotine

B - Tačka skretanja kanala bušotine

C - Završetak krivolinijskog dela i početak tangente

D - Krajnja ciljna tačka

Parametri za proračun:

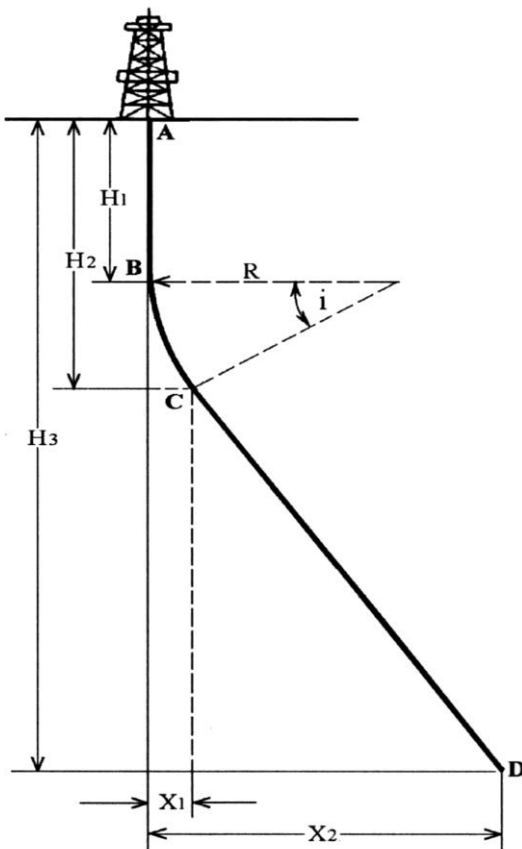
H_1 - Dubina tačke skretanja (tačka B)

H_2 - Vertikalna dubina završetka krivljenja i početak tangente (tačka C)

H_3 - Vertikalna dubina krajnje ciljne tačke (tačka D)

X_1 - Otklon kanala bušotine u tački C

X_2 - Otklon kanala bušotine u krajnjoj ciljnoj tački (tačka D)



Slika 3.6 - Elementi za proračun tangencijalnog tipa putanje

Proračun:

Za proračun ovog tipa trajektorije za početne parametre uzeti su: vertikalna dubina krajnje ciljne tačke (H_3), vertikalna dubina tačke skretanja kanala bušotine (H_1), odklon krajnje ciljne tačke (X_2) i projektovano povećanje ugla odklona na jedinicu dužine (q). Tada je:

Maksimalni ugao odklona od vertikale: kada je $D < R$, može se izračunati jednačinom:

$$i = \operatorname{tg}^{-1} \cdot \left(\frac{H_3 - H_1}{R - X_2} \right) - \cos^{-1} \left\{ \left(- \frac{R}{H_3 - H_1} \right) \right\} \cdot \sin \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{H_3 - H_1}{R - X_2} \right) \right] \quad (3.1)$$

kada je $D > R$:

$$i = 180 - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{H_3 - H_1}{X_2 - R} \right) - \cos^{-1} \left\{ \left(\frac{R}{H_3 - H_1} \right) \cdot \sin \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{H_3 - H_1}{X_2 - R} \right) \right] \right\} \quad (3.2)$$

Proračun projekcija delova trajektorije na horizontalnu i vertikalnu osu s u oba slučaja mogu izračunati sledećim formulama:

$$H_1 = H_3 - CD \cdot \cos i - R \cdot \sin i \quad (3.3)$$

$$H_2 = H_1 + R \cdot \sin i \quad (3.4)$$

$$X_1 = R - R \cdot \cos i = R \cdot (1 - \cos i) \quad (3.5)$$

$$X_2 = X_1 + (H_3 - H_1 - R \cdot \sin i) \cdot \operatorname{tgi} \quad (3.6)$$

Proračun dubine kanala bušotine:

$$L_{AB} = H_1 \quad (3.7)$$

$$L_{BC} = \frac{i}{q} \quad (3.8)$$

$$L_{CD} = \frac{H_3 - H_1 - R \cdot \sin i}{\cos i} \quad (3.9)$$

$$L_{AD} = H_1 + L_{BC} + L_{CD} = H_1 + \frac{i}{q} + \frac{H_3 - H_1 - R \cdot \sin i}{\cos i} \quad (3.10)$$

3.2.2 Projektovanje putanje formiranja-održavanja i obaranja ugla otklona (profil tipa "S")

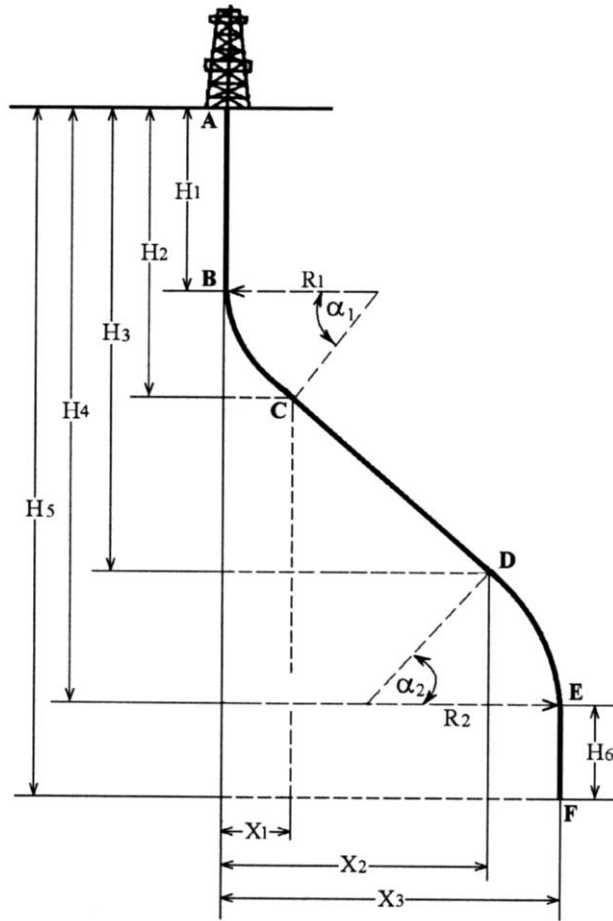
Prikazani tip trajektorije, svojim završnim delom vertikalno preseca produktivni sloj. Sastoji se iz vertikalnog dela, dela početnog krivljenja,

U skladu sa slikom 3.7 za proračun su uzeti sledeći parametri i oznake karakterističnih tačaka:

- A - Ulaz bušotine
- B - Tačka skretanja
- C - Početak tangente
- D - Kraj tangente
- E - Kraj drugog skretanja
- F - Krajnja ciljna tačka

Parametri za proračun:

- H_1 - Vertikalna dubina tačke skretanja kanala bušotine (tačka B)
- H_2 - Vertikalna dubina tačke završetka krivolinijskog dela i početka tangente (tačka C)
- H_3 - Vertikalna dubina tačke završetka tangente i početka drugog krivljenja (tačka D)
- H_4 - Vertikalna dubina završetka drugog krivolinijskog dela (tačka E)
- H_5 - Vertikalna dubina krajnje ciljne tačke (tačka F)
- X_1 - Otklon u tački C
- X_2 - Otklon u tački D



Slika 3.7 - Elementi za proračun koso-usmerene bušotine tipa "S" sa vertikalnim presecanjem produktivnog sloja

Proračun:

Kao početni parametri za proračun uzeti su: H_1 , H_4 , H_6 , X_3 , R_1 i R_2

Kod ovog tipa trajektorije bušotine maksimalni ugao odstupanja tačke E od vertikale tj. inklinacija (i) zavisi od izbora vertikalne dubine H_4 u tački E i dobija se jednačinom:

$$i = 180 - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{H_4 - H_1}{X_3 - R_1 - R_2} \right) - \cos^{-1} \left\{ \left(\frac{R_1 + R_2}{H_4 - H_1} \right) \cdot \sin \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{H_4 - H_1}{X_3 - R_1 - R_2} \right) \right] \right\} \quad (3.11.)$$

Proračun projekcija delova trajektorije na horizontalnu i vertikalnu ravan može se izračunati sledećim izrazima:

$$H_1 = H_5 - H_6 - R_2 \cdot \sin i - CD \cdot \cos i - R_1 \cdot \sin i \quad (3.12)$$

$$H_2 = H_1 + R_1 \cdot \sin i \quad (3.13)$$

$$H_3 = H_2 + CD \cdot \cos i \quad (3.14)$$

$$H_4 = H_3 + R_2 \cdot \sin i \quad (3.15)$$

$$H_5 = H_4 + H_6 \quad (3.16)$$

$$X_1 = R_1 \cdot (1 - \cos i) \quad (3.17)$$

$$X_2 = X_1 + (H_4 - H_1 - R_1 \cdot \sin i) \cdot \operatorname{tg} i$$

Proračun dužine kanala bušotine:

$$L_{AB} = H_1 \quad (3.18)$$

$$L_{AC} = L_{AB} + \frac{R_1 \cdot \pi \cdot i}{180} \quad (3.19)$$

$$L_{AD} = L_{AC} + \frac{H_4 - H_1 - R_1 \cdot \sin i}{\cos i} \quad (3.20)$$

$$L_{AE} = L_{AD} + \frac{R_2 \cdot \pi \cdot i}{180} \quad (3.21)$$

$$L_{AF} = L_{AE} + L_{EF} \quad (3.22)$$

3.2.3 Projektovanje putanje kontinuiranog građenja ugla otklona (profil tipa "J")

Trajektorija ovog tipa profila sastavljena je iz vertikalnog dela, i dela sa ravnomernim intenzitetom podizanja ugla krivljenja (slika 3.8).

Oznake karakterističnih tačaka:

A - Ulaz bušotine

B - Tačka skretanja kanala bušotine

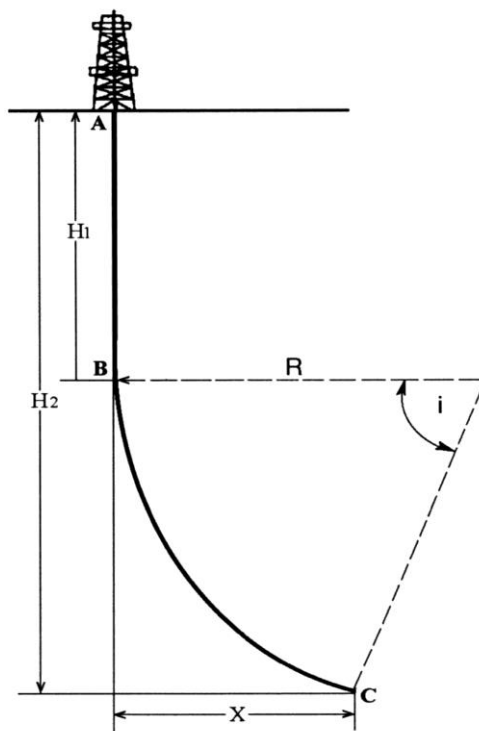
C - Krajnja ciljna tačka

Parametri za proračun:

H_1 - Vertikalna dubina tačke skretanja kanala bušotine (tačka B)

H_2 - Vertikalna dubina krajnje ciljne tačke (tačka C)

X - horizontalno rastojanje krajnje ciljne tačke (C) u odnosu na vertikalnu liniju koja se poklapa sa osom tornja.



Slika 3.8 - Putanja koso-usmerene bušotine tipa "J"

Proračun:

U procesu skretanja kanala bušotine od tačke B (slika 3.8), najracionalnije je da se povećanje ugla otklona po jedinici dužine (q) održava konstantno do konačnog ugla otklona od vertikale (i), odnosno do konačne ciljne tačke (C).

Pod uslovom da je $q = \text{const.}$, tada je i radijus krivljenja (R) konstantan, i može se izračunati sledećom formulom:

Poznavanjem R , q , i , H_1 mogu se izračunati projekcije delova trajektorije bušotine na vertikalnu i horizontalnu osu sledećim izrazima:

$$H_1 = H_2 - R \cdot \sin i \quad (3.23)$$

$$H_2 = H_1 + R \cdot \sin i \quad (3.24)$$

$$X = R - R \cdot \cos i = R \cdot (1 - \cos i) \quad (3.25)$$

Ukupna dužina kanala bušotine:

$$L_{AB} = H_1; \quad (3.26)$$

$$L_{BC} = \frac{2\pi}{180}; \quad (3.27)$$

$$L_{AC} = L_{AB} + \frac{2\pi \cdot i}{180} \quad (3.28)$$

3.3 Alati za bušenje koso-usmerenih bušotina

U procesu bušenja koso-usmerenih i horizontalnih bušotina vertikalni kanali bušotina izvede se standardnom opremom za bušenje, dok se za izradu krivolinijskog dela kanala bušotine primenjuju posebni sklopovi bušačkog pribora. S obzirom na to da je standardna kolona bušačkog pribora detaljno prikazana u stručnoj literaturi, ovde su prikazana tehnička sredstva koja se primenjuju u procesu dirigovanog bušenja

Najoptimalniji alati za koso-usmereno bušenje su oni koji omogućavaju izradu bušotine nominalnog prečnika i kod kojih dodatno proširivanje nije neophodno. Bez

obzira na to koji se alati za skretanje i vođenje bušotine koriste, osnovni principi definisanja ukupne promene uglova, intenziteta savijanja tj. jačine kolena, stvaranja novih uglova, pravaca i orijentisanja lica alata ostaju isti (Hrković & Bizjak, 2002).

Prema karakteru i principu delovanja, alate za izradu krivolinijskog dela koso-usmerenih i horizontalnih bušotina obuhvataju:

- dubinski motori opremljeni kosim prelazom,
- klinovi za skretanje
- rotaciono upravljivi sistemi - RSS
- dleta opremljena jednom mlaznicom,
- zglobni otklonitelji,
- kriva bušaća šipka,
- krivi prelaz,
- savitljive pogonske šipke,
- kompresione šipke,
- zakrivljene vodilice,
- nemagnetne teške šipke,
- stabilizeri,
- dleta.

Međusobno povezivanje nabrojanih elemenata po određenom redosledu u zavisnosti od metode bušenja (primena dubinskih motora ili rotari bušenje), veličine radijusa krivljenja i drugih uslova koji prate bušenje, obrazuje se sklop za izradu iskrivljenog dela kanala bušotine i održavanje postignutog ugla otklona. Sklop za otklon predstavlja sastavni deo kolone bušaćeg pribora, pri čemu se razlikuje po svojim osobenostima i konstrukciji u odnosu na standardnu bušaću kolonu.

3.3.1 Klinovi za skretanje

Klin za skretanje je osnovne izrade i jedini alat koji se može uspešno koristiti u stenama svih vrsta, odnosno u stenama svih čvrstoća. Njegova funkcija je omogućavanje

orijentacije i usmeravanja bušaćeg alata u projektovanom pravcu, a samim tim i kanala bušotine.

Podela klinova prema načinu upotrebe:

- klasični klin za skretanje,
- stalni klin za skretanje.

Razlika između stalnog i klasičnog klina ogleda se u tome što se klasični klin izvlači iz bušotine nakon što se usmeri i skrene, dok se stalni klin nakon ugradnje i orijentisanja u bušotini fiksira cementom ili nazubljenim čeljustima i ostaje neprekidno u tom položaju u bušotini. Klasični klin za skretanje ima dimenzije koje variraju u zavisnosti od dimenzija kanala bušotine i to u intervalu od 101,6 mm do 330,2 mm (4"-13"), sa uglom između $2^{\circ} 25'$ i 5° . Nakon što se klasični klin spusti na dno bušotine (važno je pažljivo kontrolisati da se tokom spuštanja ne izazove lom spajajućeg zavrtnja), vrši se merenje pomoću mernog instrumenta koji je spušten na užetu u orijentacioni prelaz, nakon čega se vrši kontrolno merenje. Ako je potrebno izvršiti korekciju usmeravanja klina, to se postiže okretanjem niza alatki udesno kako bi se postigao željeni položaj. Podizanjem klina za 20-30 centimetara od dna bušotine i ponovnim spuštanjem pod opterećenjem od oko $6 \cdot 10$ daN, dolazi do pucanja spajajućeg zavrtnja koji drži klin, stabilizer i dleto zajedno. Kada klin pukne, cirkulacija se ponovno uspostavlja ispiranjem, dok se dleto oprezno spušta niz klin okretanjem od 10-15 obrtaja u minuti, uz minimalno opterećenje na dletu. Kada dleto zauzme položaj ispod pete klina, opterećenje postepeno raste, a nakon što se zabuši 2-3 metra, dleto se zajedno sa nizom alata izvlači na površinu. Izvlačenje klina na površinu predstavlja najrizičniji deo celog procesa, odnosno trenutak kada stabilizer i dleto ulaze u korito klina. Momenat u kom se izvlači stabilizer u vrat klina, beleži se na indikatoru za težinu. Nakon što se klin izvuče iz kanala bušotine, najpre se u bušotinu spušta kompozicija alata koji služi za proširivanje kanala, a zatim kompozicija alata koji se koristi za nastavak bušenja u čijem sastavu se nalazi nemagnetna teška šipka. Taj sastav alata se koristi za bušenje 9-18 metara, a zatim se vrši kontrolno merenje elemenata trajektorije u kanalu bušotine. Pomoću klina, u usmerenom kanalu

bušotine, moguće je promeniti ugao nagiba i azimuta, kako u levo tako i u desno (Bizjak 2004).

Pri tome je potrebno da se poznaju tri usmeravajuća faktora:

- postojeći nagib kanala bušotine, odnosno njegov otklon,
- azimut lica klina,
- željeni smer kanala bušotine, odnosno traženi azimut i nagib.

Stalni klin se koristi kako bi se zasekao novi kanal bušotine i usmerio kroz tvrde i vrlo tvrde stene, kao i za skretanje kanala bušotine iz već izbušenog dela, posebno kada su postavljene zaštitne cevi.

Stalni klin ima manji prečnik od kanala za 3,2-12,7 mm (1/8"-1/2"). Nagib korita klina je između 2°-3°, a poluprečnik zaobljenja korita je veći od nominalnog prečnika bušotine za 10-15 mm. Dužina kosine klina varira u zavisnosti od prečnika klina i nagiba korita, obično između 2,5-4,5 m. Sidro koje je dugačko 8-10 m postavlja se na donji kraj klina kako bi se bolje učvrstio u bušotini. Na vrhu klina je prisutan otvor za zavrtanj prečnika 1", kojim se klin spaja s ostatkom alata. Zavrtanj se odseca nakon što se klin postavi u bušotinu pod opterećenjem od 10-12 · 10³ daN.

Stalni klin bez čeljusti (slika 3.9) koristi se kada se novi kanal bušotine izrađuje iz nezacevljenog dela kanala bušotine, poznatog kao "open hole". Nakon što se klin spusti na predviđenu dubinu, pozicionira se kao i standardni (klasični) klin, a zatim se vrši cementacija cementnom kašom. Čim se završi cementacija izvedena kroz produžno vreteno, kida se štift, a zatim se alat izvlači iz bušotine.

Nakon što se cement stvrdne, bušenje se nastavlja duž klina koristeći standardni alat za koso-usmereno bušenje. Opterećenje na dletu iznosi 5-10 · 10³ daN, dok se brzina obrtanja održava oko 50 o/min. Buduće operacije u novom kanalu bušotine se mogu neometano izvoditi, što ne može uvek da se kaže za klasičan klin.

Delovi stalnog klina bez čeljusti:

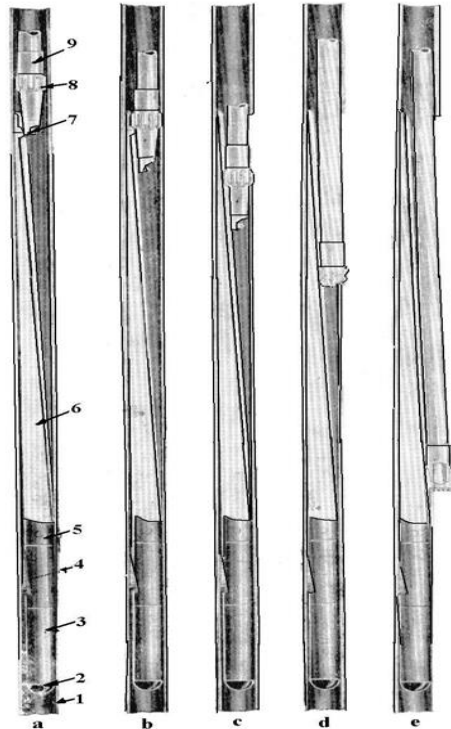
1. Čelični klin;
2. Zavrtanj;

3. Prelaz za orijentaciju;
4. NMTŠ sa oko 103 daN teških šipki;
5. Bušaće šipke;
6. Anker;
7. Vodicica (polovno dleto);
8. Vreteno;
9. Vrh zaglavljenog alata koji je potrebno zaobići;
10. Stabilizer;
11. Dleto;
12. Teške šipke;
13. Cementni most;
14. Jezik klina.



Slika 3.9 - Konstrukcija stalnog klina (www.tmot.ca)

Stalni klin sa čeljustima primenjuje se za potrebe zasecanja kanala bušotine iz koloni zaštitnih cevi. Na slici 3.10 grafički su prikazane sledeće operacije: a) pozicioniranje klina u kanalu bušotine; b) aktiviranje čeljusti za kidanje štifta; c) početak zasecanja novog kanala bušotine; d) zasecanja frezerom; e) poslednja faza zasecanja čeličnim frezerom.



Slika 3.10 - Stalni klin sa čeljustima (Bizjak, 2004)

Sastav alat za skretanje ima sledeće elemente:

- petu kojom se aktiviraju čeljusti,
- sidro,
- čeljusti,
- telo klina,
- zavrtnja koji spaja klin i alat,
- frezer i teške šipke.

Nakon što se klin ugradi na predviđenu dubinu i orijentiše, sledi aktivacija čeljusti kojima se učvršćuje klin u koloni, kida se štift i otvara se prozor u koloni zaštitnih cevi čeonim frezerom. Proširivanje otvora nakon bušenja i probijanja kolone, kao i izlazak iz kolone vrši se posebnim alatima. Ovom procedurom se omogućuje da adekvatan sastav alata bude spušten u bušotinu i bušenje bude nastavljeno.

3.3.2 Dubinski motori sa kosim prelazom

Najčešće korišćena tehnika za promenu trajektorije bušotine koristi komad opreme poznat kao kosi prelaz i dubinski motor. Kosi prelaz je kratka cev prečnika koji je približno isti kao prečnik teških šipki i sa navojnim spojevima na oba kraja. Proizveden je tako da je osa donjeg spoja blago pomerena (manje od 3 stepena) u odnosu na osu gornjeg spoja. Kada se uvrsti u sastav alata (BHA), stvara ugao nagiba elementima BHA ispod njega i samim tim osi dleta. Međutim, uvođenje kosog prelaza u BHA znači da je centar dleta takođe pomeren od centra linije bušotine iznad kosog prelaza i nije moguće rotirati dleto rotiranjem niza bušaćeg alata sa površine. Čak i da je to moguće, efekat kosog prelaza bi bio eliminisan jer ne bi postojao preferirani smer za bušenje (Heriot Watt, 2005).

Benefit korišćenja dubinskih motora u procesu bušenja koso-usmerenih i horizontalnih bušotina u odnosu na druge bušaće alate za dirigovano bušenje izražava se na sledeći način:

- koso-usmerena sekcija kanala bušotine buši se nominalnim prečnikom dleta;
- dubinski motor se ne vadi iz bušotine sve do postizanja željenog ugla i azimuta kanala bušotine;
- u kanalu bušotine nema naglih iskrivljenja.

Standardni sastav alata za dirigovano bušenje upotrebom dubinskog motora sastoji se od:

- dleta nominalnog prečnika,
- dubinskog motora,
- kosog prelaza na motoru,
- nemagnetne teške šipke,
- teških šipki / bušaćih teških šipki,
- bušaćih šipki.

U procesu izrade koso-usmerenih i horizontalnih bušotina, najširu primenu imaju dubinski vijčani motori koji ostvaruju velike obrtne momente uz male brzine

obrtnja. Ovi motori imaju i znatno manju dužinu kućišta, u odnosu na turbinske motore, što omogućava postavljanje pribora za izradu iskrivljenja (obično su to krivi prelazi) iznad i ispod motora na malom međusobnom rastojanju i rastojanju od dleta.

Dubinski motori dužine 6 m su najpogodniji za koso-usmereno bušenje, dok se zadovoljavajući rezultati mogu postići dubinskim motorima dužine 9 m. Nagib kosog prelaza je bitan faktor kod kraćih dubinskih motora, posebno pri građenju ugla, dok se kod motora koji su dugački 9 m to ne odražava na brzinu građenja ugla. Za izbor kosog prelaza treba uzeti u obzir:

- prečnik bušotine,
- intenzitet građenja ugla,
- dužinu kanala bušotine čiji su uglovi građeni upotrebom dubinskog motora.

Ako se trajektorija bušotine izvodi pomoću turbinskih bušilica, gde se osovina turbinske bušilice tokom rada rotira u desno, tada se javlja reaktivni momenat koji uzrokuje zakretanje bušilice u levo. U situaciji pozicioniranja turbinske bušilice u određeni smer, odnosno azimut, treba uzeti u obzir ovaj reaktivni momenat.

3.3.3 Rotaconi upravljivi sistem – RSS (Rotary Steerable System)

Rotary Steerable System (RSS), poznat i kao rotacioni upravljivi sistem predstavlja napredak u tehnologiji dirigovanog bušenja koji rešava izazove sa dubinskim motorima i konvencionalnim rotacionim sklopovima. Da bi se pokrenula promena u trajektoriji bušotine uz pomoć dubinskih motora rotacija bušenja se zaustavlja i kosi prelaz na motoru se orijentiše tako da pokazuje u pravcu nove trajektorije. Ovaj režim poznat kao režim slajdovanja obično stvara veće trenje na bušaćem alatu. U slučajevima ekstremnog bušenja sa velikom udaljenošću cilja, trenje se povećava do tačke u kojoj nema dovoljno aksijalnog opterećenja

koje bi prevazišlo otpor bušaćeg alata u odnosu na površinu zida bušotine čime dalje bušenje postaje nemoguće. Kako bi prevazišli ovu ograničenost u sklopovima sa dubinskim motorima, RSS je razvijen početkom 1990-ih godina kao odgovor na potrebu bušenja sa produženim dosegom (Mitchell, 2006).

Rotacioni upravljivi sistem, predstavlja ključnu tehnologiju u procesu bušenja koso-usmerenih i horizontalnih bušotina. Ovaj napredni sistem omogućava precizno upravljanje pravcem bušenja tokom celog procesa, što rezultira efikasnijim, tačnijim i pouzdanijim bušenjem u poređenju sa tradicionalnim metodama.

Jedna od glavnih prednosti RSS alata je mogućnost bušenja kanala sa punim, nominalnim prečnikom dleta, što osigurava stabilniji kanal bušotine i smanjuje rizik od oštećenja opreme. RSS alat ostaje u bušotini sve dok se ne postigne željeni nagib i smer kanala, izbegavajući nagla iskrivljenja ili kolena u kanalu bušotine. Ovo omogućava veću tačnost i kontrolu nad procesom bušenja.

Rotacioni upravljivi sistem funkcioniše na principu primene bočne sile na sličan način kao i nepomični sistemi. Međutim, u ovim sistemima je moguće rotirati bušaći alat čak i kada se buši usmereno ili kada je u toku izrada sekcije u kojoj se održava ugao. Stoga je moguće rotirati kompoziciju bušaćeg alata u svakom trenutku tokom operacije bušenja. To je poželjno iz mnogo razloga, pe svega zato što je utvrđeno da je mnogo lakše iznošenje nabušenog materijala iz bušotine kada se bušaći alat rotira. Kada se bušaći alat ne rotira, postoji tendencija da se nabušeni materijala nagomila oko alata i izazove zaglavu istog (Heriot Watt, 2005).

Uobičajeni sastav RSS sistema obuhvata dleto punog profila, nemagnetnu tešku šipku, tešku bušaću šipku i bušaću šipku. Koso-usmereno bušenje se obično izvodi uz pomoć ovih komponenti. Za razliku od tradicionalnih metoda koje zahtevaju klasične alate poput klinova za skretanje ili turbinskih motora, RSS tehnologija omogućava precizno i pouzdano bušenje bez potrebe za čestim izvlačenjem bušaće opreme iz bušotine radi podešavanja pravca.

Pravilan odabir i postavljanje RSS sistema su ključni faktori koji utiču na efikasnost i tačnost procesa bušenja. Integracija RSS sistema sa drugim naprednim tehnologijama, kao što su sistemi za merenje pritiska (Pressure While Drilling - PWD) ili sistemi za merenje orijentacije (Orientation While Drilling - OWD), dodatno unapređuje mogućnosti kontrole i nadzora tokom bušenja. Ovi sistemi omogućavaju neprekidno prikupljanje podataka u realnom vremenu, što omogućava inženjerima i operaterima brzo reagovanje i prilagođavanje strategije bušenja u skladu sa promenama u geološkim uslovima ili zahtevima projekta.

Push-the-bit (PTB) i Point-the-bit (PTB) su dva glavna tipa Rotary Steerable System (RSS) sistema koja se koriste u industriji bušenja. Ovi sistemi se razlikuju po načinu kako se vrši upravljanje pravcem bušenja.

Push-the-bit (PTB) RSS sistem: U PTB sistemu, rotaciona sila se prenosi direktno na dleto bušotine, što omogućava da bušaće glave budu gurnute napred duž bušotine. Ovaj pristup omogućava veću kontrolu nad bušenjem i preciznije praćenje i upravljanje pravcem bušotine. PTB sistemi su poznati po svojoj sposobnosti da ostvare visoku stopu penetracije i efikasnost u bušenju, što ih čini popularnim izborom u mnogim aplikacijama.

Point-the-bit (PTB) RSS sistem: U PTB sistemu, rotaciona sila se prenosi na samu glavu bušotine, što omogućava da se cela glava rotira kako bi se promenio pravac bušenja. Ovaj pristup omogućava veću stabilnost i manju frikciju između bušotine i formacije, što može doprineti povećanju efikasnosti bušenja u nekim situacijama. PTB sistemi su poznati po svojoj sposobnosti da održe konstantan pravac bušenja čak i u prisustvu složenih geoloških formacija.

Oba tipa RSS sistema imaju svoje prednosti i mane, i izbor između njih zavisi od specifičnih zahteva projekta, geoloških uslova, i preferencija operatera. Međutim, kako tehnologija napreduje, sve više kompanija razvija hibridne RSS sisteme koji kombinuju karakteristike PTB i PTB sistema kako bi pružili još veću fleksibilnost i efikasnost u bušenju koso-usmerenih i horizontalnih bušotina.

3.3.4 Ostali alati za ditigovano bušenje

Dleto sa jednom mlaznicom se primenjuje za bušenje koso-usmerenih i horizontalnih bušotina kroz meke stene koje se mogu razarati pod dejstvom pritiska mlaza isplake uz određeno opterećenje na dleto. Na dleto su namenski ugrađene mlaznice i to, jedna sa većim prečnikom, i suprotno od nje, još jedna do dve mlaznice manjeg prečnika. Iznad dleta, preko izduženog prelaza, postavlja se stabilizer, zatim nemagnetna teška šipka, potreban broj klasičnih teških šipki i kolona bušaćih šipki.

Dleto se spusti na dno bušotine, mlaznica sa većim prečnikom se orijentiše u željenom pravcu, i bušenje započinje uz maksimalno moguću količinu isplake i projektovano opterećenje na dleto. U određenim intervalima dleto se podiže, a okretanje kolone bušaćeg alata uspostavlja se nakon svakog izbušenog metra u cilju otklanjanja naprezanja u području dleta.

Posle toga alat se spusti ponovo na dno bušotine i dleto se orijentiše. Kada se postigne željeni otklon, bušaći alat se vadi iz bušotine, a bušenje nastavlja standardnom kompozicijom bušaćeg alata.

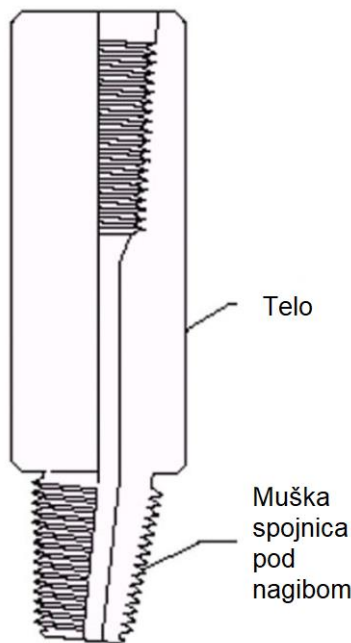
Ako je potrebno u procesu bušenja korigovati postignute uglove, postupak se ponavlja tako što se ponovo spušta kompozicija alata na čijem vrhu se nalazi dleto sa jednom mlaznicom.

Zglobni otklonitelj predstavlja proširivač koji se sa kompozicijom bušaćeg alata povezuje pomoću zgloba koji omogućava rotaciju donjeg dela kompozicije bušaćeg alata pod određenim uglom.

Otklonitelj se uz pomoć kompozicije bušaćeg alata spušta na dno bušotine gde se vrši njegova orijentacija. Zatim se dleto pod povećanim opterećenjem i cirkulacijom isplake oslanja na dno bez rotacije uz povremeno podizanje bušaćeg alata. Ovaj proces se ponavlja sve do postizanja novog pravca kanala bušotine. Nakon toga se primenom minimalne rotacije bušaćeg alata (20-40 °/min), produbljuje kanal bušotine 4-6 m i vrši se kontrola ugla i azimuta.

U narednoj fazi se vrši proširenje izbušenog kanala, dok se bušenje nastavlja standardnim bušaćim alatom uz konstantno kontrolisanje ugla i azimuta. Primjenjuje se za skretanje kanala bušotine u procesu izrade koso-usmerenih bušotina metodom rotari bušenja.

Kosi prelaz je obavezan element za krivljenje bušotine u procesu bušenja koso-usmerenih i horizontalnih bušotina primenom dubinskih motora (turbinskih ili vijčanih). Kosi prelaz (slika 3.11) predstavlja manju spojnicu s navojima koji su obrađeni tako da mogu promeniti pravac kanala bušotine. Osa gornjeg navoja se poklapa sa osom prelaza dok je donji navoj povijen pod uglom 1° - 3° od ose prelaza.



Slika 3.11 - Šematski prikaz kosog prelaza

Sklop bušaćeg pribora uključujući i krivi prelaz spušta se do tačke gde treba ostvariti krivljenje, a pribor za merenje iskrivljenosti kanala bušotine spušta se unutar nemagnetne teške šipke. Pribor je opremljen fotokamerom kojom se ostvaruje proces orijentacije krivog prolaza. Na površini se snimak analizira i određuje stvarna orijentacija. Zatim se vrši upoređivanje stvarne orijentacije sa

projektovanom rotiranjem sasatva bušačeg pribora levo ili desno kako bi se uspostavio potreban pravac.

Intenzitet krivljenja kanala bušotine pri korišćenju krivog prelaza zavisi od geometrijskih razmera elemenata sklopa bušačeg pribora, čvrstoće i težine dubinskog motora i postavljenih iznad njega teških šipki, prečnika bušotine, režima bušenja, sposobnosti dleta za bočno frezovanje i fizičko mehaničkih osobina stena kroz koje se buši.

Ne preporučuje se primena krivog prelaza ako turbinski motori imaju veću dužinu. Obično se primenjuju u sastavu s jednosekcionim, skraćenim ili kratkim turbinskim motorom.

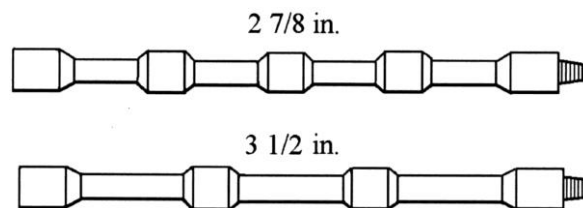
Savitljive pogonske šipke primenjuju se kada je potrebna nagla promena ugla krivljenja i duže održavanje pravolinijskog pravca bušotine u procesu izrade horizontalnih bušotina malog radijusa krivljenja. Postavljaju se na vrhu sklopa bušačeg pribora, pa su gornjim krajem povezane sa bušačom kolonom u vertikalnom kanalu bušotine, a donjim krajem sa sklopom bušačeg pribora za otklon kanala bušotine.

Svaka savitljiva pogonska šipka duga je oko 6 m i zarezana na po 12 mesta, koje posmatramo sa strane podsećaju na oblik grčkog simbola omega (Ω). Zarezi omogućavaju potrebnu savitljivost. Kroz unutrašnjost ovih šipki ugradjena je savitljiva cev kojom se uspostavlja cirkulacija isplake.

Savitljiva pogonska šipka u sklopu bušačeg pribora za otklon kanala bušotine prisiljava dleto da pod uticajem rotacije i opterećenja vertikalne bušaće kolone krivi kanal bušotine dok ne zadobije horizontalan položaj.

Savitljive kompresione šipke se primenjuju za povećanje ugla otklona većeg od $6,1^{\circ}/10$ m, u procesu izrade horizontalnih bušotina. U zavisnosti od prečnika kompresione šipke se izradjuju od različitih marki čelika. Na primer, kompresione šipke prečnika 0,073 (2 7/8) m izradjuju se od čelika G-105 (slika 3.12), ili kompresione šipke prečnika 0.0889 (3 1/2") m izradjuju se od čelika marke S-135.

Po dužini ovih šipki ravnomerno su rasporedjena zadebljanja koja služe za centriranje kompresionih šipki u iskrivljenom ili horizontalnom kanalu bušotine, pri čemu je kompresiona šipka maksimalno zaštićena od habanja jer je na taj način otklonjen kontakt cevi sa zidom bušotine, prihvatanje naprezanja i kvalitetno čišćenje bušotine.



Slika 3.12 - Kompresione savitljive bušaće šipke (Hrković, 2002)

Zakrivljene vodilice primenjuju se u procesu izrade horizontalnih bušotina malog radijusa krivljenja. Sastavljene su od nerotirajućeg kućišta, unutrašnjeg pogonskog vretena koje prenosi rotaciju vertikalne bušaće kolone na dleto i zaptivnih sklopova na vrhu i dnu zakrivljene vodjice na mestima na kojima se kućište koje ne rotira povezuje sa vretenom koje rotira.

Kada se u procesu bušenja postigne horizontalan položaj kanala bušotine, zakrivljena vodilica se isključuje iz sklopa pribora za otklon kanala bušotine, a u bušotinu se postavlja sklop za održavanje postignutog ugla otklona.

Nemagnetna teška šipka izrađuje se od materijala koji je specijalno izrađen tako da nema uticaj na iglu kompasa. To omogućava da se u nemagnetnoj teškoj šipki izvrši merenje instrumentom, koji u sebi sadrži magnetnu iglu.

Stabilizer se ugrađuju u sklop za održavanje ugla otklona u cilju postizanja veće krutosti kolone bušaćeg pribora i za izradu pravolinijskih delova kanala bušotine. U zavisnosti od veličine radijusa krivljenja kanala bušotine i geoloških karakteristika sredine kroz koju se buši, u sastava alata za dirigovano bušenje uvrštava se jedan do tri stabilizera.

U procesu izrade koso-usmerenih i horizontalnih bušotina najčešće se primenjuju konusna i kompaktna dleta (dleta s nepomičnom radnom površinom: PDC -polikristalna i dijamantska dleta). Koji će tip dleta biti izabran, u velikoj meri zavisi od fizičko mehaničkih karakteristika stena kroz koje se buši.

U homogenim stenama postižu se veliki učinci primenom konusnih dleta. Naime, u ovim uslovima ako se sklopom pribora dleto potiskuje prema podini a istovremeno rotira udesno, kanal bušotine se povija prema podini i udesno. Međutim, ako se dleto potiskuje prema krovini i rotira udesno, kanal bušotine se povija prema krovini i ulevo.

S druge strane, primenom konusnih dleta postoji mogućnost većeg habanja ili loma ležajeva zbog čega dolazi do otpadanja i drobljenja konusa dleta što uslovljava pojave havarija. Instrumentacija (likvidacija havarija) u uslovima zakrivljenih i horizontalnih kanala bušotine mnogo je teža i neizvesnija u odnosu na instrumentaciju kod vertikalnih bušotina. Zbog toga, ako ne preovladjuju neki drugi uslovi, u ovim slučajevima prednost se daje kompaktnim dletima, pri čemu su verovatnoće havarija mnogo manje.

Pri bušenju kroz abrazivne stene ili kroz ispucane stene sa vertikalnim pukotinama ili pukotinama sa strmim padom, veći učinak se postiže primenom konusnih dleta. Međutim, kada se buše koso-usmerene i horizontalne bušotine malog prečnika, posebno kada je za postizanje većeg učinka potrebna veća brzina rotacije dleta, preporučuje se primena kompaktnih dleta.

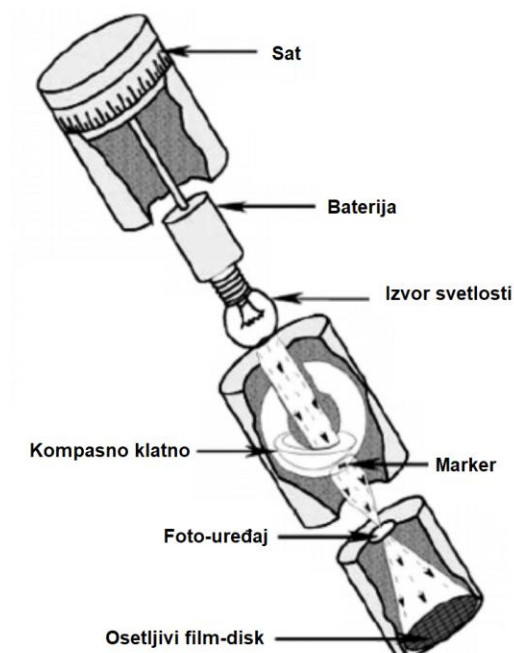
Kompaktna dleta koja se primenjuju kod izrade pomoćnih kanala višekanalnih koso-usmerenih i horizontalnih bušotina, obično imaju manju visinu tela, manju visinu ramena i tuplji profil radne površine u odnosu na kompaktna dleta koja se primenjuju za bušenje vertikalnih bušotina kroz istu vrstu stena. Time se postiže bolje upravljanje bušačim priborom, jer primena dleta sa kraćim telom omogućava postavljanje stabilizera na kraćem rastojanju od radne površine dleta a samim tim i lakše povijanje kanala bušotine.

Iz napred izloženog može se zaključiti da izrazita bočna naprezanja kojima su dleta izložena pri radu u zakrivljenom i horizontalnom kanalu bušotine mogu dovesti do štetnih učinaka. Zbog toga treba oprezno izabrati vrstu i tip dleta, kao i režim njegovog opterećenja i rotacije.

4 MERNI INSTRUMENTI

U ranijim vremenima, najčešće korišćeni uređaj za određivanje uglova tokom koso-usmerenog bušenja bio je jednosnimajući fotografski uređaj, „Single-shot“ (slika 4.1). On se sastoji od dela sa kompasnim klatnom, dela za foto-kameru, dela za baterije i dela za satni mehanizam. Kompas i klatno su integrisani u jednu jedinicu smeštenu u donjem delu uređaja, kombinujući magnetni kompas za pokazivanje azimuta i klatno za merenje otklona bušotine, odnosno nagiba u odnosu na vertikalnu. Opseg otklona klatna omogućava merenje uglova u različitim intervalima: $0-5^\circ$; $0-20^\circ$ i $0-90^\circ$ stepeni. Deklinacija kompasa je prilagođena specifičnoj geografskoj širini, a kompas pokazuje magnetni smer (Kalinin, 1997).

Nagib bušotine u određenoj tački merenja se utvrđuje pomoću klatna koje je pričvršćeno na gornji deo uređaja putem posebno osetljivog ležaja. Na vrhu klatna postoji marker u obliku krsta koji se pomera iznad stakla prstenastog oblika ispod kog je pozicioniran kompas kojim se meri azimut. Ovaj deo kompasa je ispunjen tečnošću koja ublažava vibracije klatna tokom procesa merenja. Telo za održavanje pritiska služi za kompenzaciju eventualnog širenja tečnosti u slučaju povećanja temperature u bušotini. Gornji deo pribora, koji je izrađen od stakla otpornog na pritisak, se zatvara pomoću zatvarača pre spuštanja instrumenta. Pre nego što se instrument spusti, satni mehanizam se podešava na određeno vreme potrebno da stigne do dna bušotine, smešta se u svoje kućište i spušta se niz užu ili ubacuje u bušaću šipku. Merenje se zaustavlja kada instrument dosegne nemagnetnu tešku šipku, jer je kompas smešten unutar nemagnetne teške šipke i treba minimizirati uticaj dleta i bušaću šipku. Bilo kakvo pomeranje instrumenta se ne sme vršiti jedan minut pre početka snimanja. Kada se instrument stabilizuje u merenoj tački, na diskfilm se beleži relativni položaj kompasa i klatna. Nakon završetka snimanja, instrument se vadi iz bušotine, a film se stavlja u specijalnu kutiju za razvijanje i razvija. Ovim instrumentom mogu se meriti uglovi od vertikale do 90° pri temperaturama do 150°C (Hrković & Bizjak, 2002).



Slika 4.1 - Jednosnimajući merni uređaj (Seibi, 2009)

Instrument za merenje orijentacije bušaćih alatki na dnu bušotine zapravo je osnovni "Single shot" merni uređaj proširen dodatnim komponentama što omogućava da se taj uređaj koristi i kao direktni i kao indirektni instrument kojim se orijentišu alati dnu bušotine.

Azimut meren u bušotini, meri se u odnosu na magnetni sever i potrebno ga je ispraviti u geografski azimut tako što se doda lokalna magnetna deklinacija.

Iz karte izogona možemo dobiti deklinaciju, što za određenu lokaciju predstavlja ugao između magnetnog i geografskog severa. Korekcija azimuta iz magnetnog u geografski smer vrši se tako što se dodaje ili oduzima lokalna magnetna deklinacija navedena u tabeli (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Lokalna i magnetna deklinacija

Očitavanje na snimku	Deklinacija - istok	Deklinacija - zapad
N-E	Dodavanje smeru	Odbijanje od smera
S-E	Odbijanje od smera	Dodavanje smeru
S-W	Dodavanje smeru	Odbijanje od smera
N-W	Odbijanje od smera	Dodavanje smeru

Savremeni uređaj za merenje elemenata krivine prilikom bušenja koso-usmerenih bušotina je MWD.

Measurement While Drilling (MWD) tehnologija predstavlja ključni deo procesa bušenja naftnih i gasnih bušotina, omogućavajući neprekidno merenje i prikupljanje podataka tokom samog procesa bušenja. MWD alati su integrisani u bušaći alat i omogućavaju prenos podataka u realnom vremenu sa dna bušotine do površine, što omogućava inženjerima i operaterima da dobiju važne informacije o geološkim formacijama, orijentaciji bušotine, fluidima u bušotini i drugim parametrima od interesa.

Jedna od ključnih komponenti MWD sistema je senzorska oprema koja obuhvata različite senzore za merenje parametara kao što su brzina rotacije, ugao nagiba, orijentacija, temperatura, pritisak, gustina fluida i drugi. Ovi senzori se nalaze u MWD alatu i omogućavaju neprekidno praćenje stanja u bušotini tokom procesa bušenja. Podaci koje prikuplja MWD sistem su od suštinskog značaja za donošenje odluka u realnom vremenu tokom bušenja, kao što su prilagođavanje brzine bušenja, pravac bušenja i optimizacija procesa.

Jedna od ključnih prednosti MWD tehnologije je eliminacija potrebe za izvlačenjem bušaće opreme radi merenja parametara u bušotini. Umesto toga, MWD alati omogućavaju neprekidno merenje tokom samog procesa bušenja, čime se štedi vreme i resursi, a sam proces bušenja postaje efikasniji i produktivniji.

Osim toga, MWD tehnologija omogućava preciznije pozicioniranje bušotine i smanjenje rizika od neželjenih događaja kao što su odstupanja ili gubitak kontrole nad bušotinom.

Napredak u MWD tehnologiji je doveo do razvoja sve sofisticiranijih sistema koji omogućavaju još preciznije merenje i prikupljanje podataka tokom bušenja. Integracija MWD sistema sa drugim tehnologijama kao što su bušaće glave sa senzorima za praćenje vibracija (Vibration While Drilling - VWD) ili sistema za merenje pritiska (Pressure While Drilling - PWD) dodatno unapređuje mogućnosti nadzora i kontrole tokom bušenja, doprinoseći efikasnosti i bezbednosti procesa.

5 TEHNIKA I TEHNOLOGIJA BUŠENJA HORIZONTALNIH BUŠOTINA

Osnovni cilj izrade i primene horizontalnih bušotina je povećanje površine kontakta zida bušotine sa kolektor stenama ležišta nafte, gasa, podzemnih voda i geotermalne energije, a samim tim povećavanje proizvodnje i ukupnog koeficijenta iskorišćenja ležišta. Horizontalni kanali bušotina buše se najčešće paralelno sa slojevima u ležištu.

Horizontalne kanale osim proizvodnih bušotina često imaju i injekcione bušotine. Time se ostvaruje velika površina dodira kanala bušotine i ležišnih stena, što povećava uspešnost utiskivanja fluida (kada se za povećanje eksploatacije ugljovodonika koriste sekundarne metode), što je veoma značajno u smislu poboljšanja iskorišćenja nafte.

Suprotno od produktivnosti vertikalnih bušotina koja najčešće zavisi od parametara izbušenih stena (poroznosti formacije, propusnosti formacije, zasićenja fluidima i pornog pritiska), produktivnost horizontalnih naftnih, gasnih, vodonosnih i geotermalnih bušotina pored ostalih parametara u velikoj meri zavisi od dužine horizontalnog kanala bušotine, konstrukcije i opreme bušotina, dok dužina zavisi od litološkog sastava stene, geo-termičkih uslova i vrste horizontalne bušotine.

U slučajevima kada je tehnologija razrade ležišta neekonomična i ne daje adekvatne rezultate, koristi se horizontalno bušenje. Ova tehnologija se primenjuje u cilju razrade:

- ležišta koja imaju vertikalnu pukotinsku propusnost;
- ležišta koja su delimično iskorišćena i u kojima su prisutne zone zaostalih ugljovodonika;
- ležišta kod kojih rezervoar stene imaju slabu propusnost;
- ležišta koja su zasićena teškim ugljovodonicima;
- ležišta male moćnosti;

- ležišta definisana vodonapornim režimom eksploatacije, kod kojih pri proizvodnji može doći do konusiranja podinske slojne vode.

Pripremni radovi za izradu horizontalnih bušotina su komplikovaniji, a njihova realizacija traje duže u odnosu na vertikalne bušotine, kao i koso-usmerene. Međutim, horizontalnim bušotinama postiže se nesrazmerno veći kontakt kanala bušotine sa kolektor stenama, što omogućava znatno povoljnije uslove za postizanje veće produktivnosti u odnosu na vertikalne bušotine izbušene u istim uslovima. Odluka za bušenje horizontalnih bušotina treba da bude zasnovana na proceni očekivanih proizvodnih mogućnosti bušotine. Procena se zasniva na detaljnom proučavanju raspoloživih pokazatelja o geološkoj gradji i petrofizičkim svojstvima kolektor stena, rezultatima analiza geofizičkih merenja.

Economides i Nolte (1989), ustanovili su odnose indeksa produktivnosti horizontalnih i vertikalnih bušotina u vidu relacije:

$$\frac{J_h}{J_v} = \frac{\ln(r_v / r_b)}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (l/2)^2}}{L/2}} + \frac{\lambda h}{L} + \frac{\lambda h}{2r_b} \quad (5.1)$$

$$a = (L/2) \cdot \left\{ 0,5 + \left[0,25 + \left(\frac{r_v}{L/2} \right)^4 \right]^{0,5} \right\}^{0,5} \quad (5.2)$$

$$\lambda = (k_h / k_v)^{0,5} \quad (5.3)$$

Gde su:

J_h = Indeks produktivnosti horizontalne bušotine

J_v = Indeks produktivnosti vertikalne bušotine

r_v = Radijus drenaže ležišta

Rb = Radijus bušotine

H = Lateralna dužina bušotine

λ = Izotropnost proizvodne stene izražena kao deo jedinice:

$\lambda = 1,0$ predstavlja potpunu izotropnost

$\lambda = 3$ predstavlja uobičajenu izotropnost

$\lambda = 0,25$ predstavlja vrlo povoljnu izotropnost

kh = Propusnost stena u horizontalnom, smeru

k_v = Propusnost stena u vertikalnom smeru

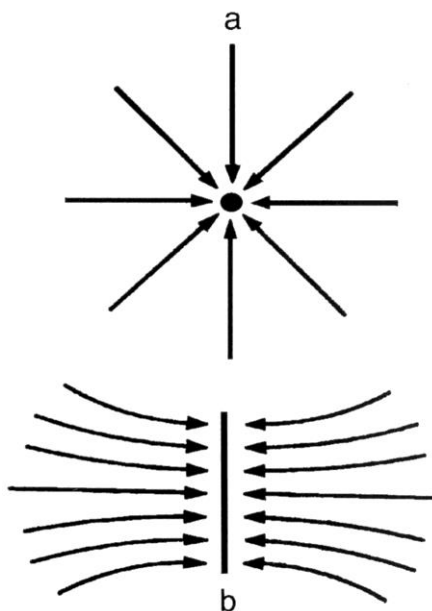
Ukoliko je indeks produktivnosti horizontalne bušotine minimalno dva puta veći od vertikalno izbušene, onda se ona smatra ekonomski isplativom.

$$\frac{L_h}{L_v} > 2 \quad (5.4)$$

Howes (1988) je grafički prikazao geometriju dotoka fluida u kanale vertikalnih i horizontalnih bušotina na osnovu čega se jasno zapažaju razlike u procesima dotoka fluida u kanale oba tipa bušotina (slika 5.1). Ta razlika se najbolje vidi u sledećem:

U slučaju vertikalnog kanala bušotine dotok fluida je radijalan (slika 5.1a), sa znatnim ubrzanjem fluida u pribušotinskoj zoni. Sa povećanjem brzine proticanja fluida, povećavaju se otpori hidraulike što usporava uticanje fluida u kanal bušotine. U kanalima vertikalnog tipa se u takvim uslovima mora uspostaviti velika depresija u odnosu na slojni pritisak u produktivnom sloju.

Doticanje fluida u horizontalni tip bušotine je linearan (slika 5.1b), dok je brzina proticanja fluida u pribušotinskoj zoni jednaka ili neznatno manja u odnosu na konturne površine drenaže pa je potrebna veoma mala depresija u horizontalnom kanalu bušotine. Pored toga, horizontalnim kanalom bušotine pokrivena je znatno veća površina samog sloja, čime je stvorena mogućnost za znatno veće utok fluida u kanal bušotine u jedinici vremena.



Slika 5.1 - Šematski prikaz geometrije dotoka fluida u: a) vertikalne i b) horizontalne bušotine

5.1 Projektovanje horizontalnih bušotina

5.1.1 Vrste i tipovi horizontalnih bušotina

Prema nekim autorima (Joshi, 1991), identifikuju se dve vrste bušotina sa horizontalnim segmentima kanala:

- Lateralne (bočne) bušotine,
- Horizontalne bušotine.

Lateralne (bočne) bušotine su konstruisane iz postojećih kanala vertikalnih ili koso-usmerenih bušotina, pri čemu je dužina horizontalnog segmenta kanala između 30 m i 200 m.

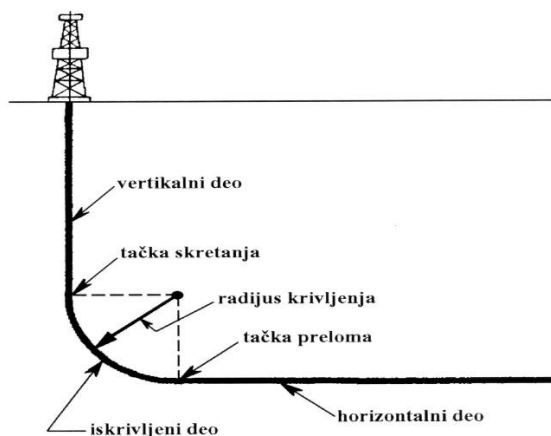
Horizontalne bušotine, s druge strane, predstavljaju nove bušotine kreirane od usta bušotine do konačne dubine sa dužinom horizontalnog kanala od 200 m pa do nekoliko hiljada metara.

Kod projektovanja horizontalnih bušotina koristi se samo profil bušotine tipa "J" koso-usmerenih bušotina, sastavljen od tri međusobno povezana dela (slika 5.2):

- vertikalni deo,
- iskrivljeni deo,
- horizontalni deo.

Deo kanala od ušća bušotine do tačke gde počinje njegovo skretanje u krivolinijski deo predstavlja vertikalni deo bušotine. Tačka gde počinje krivljenje vertikalnog dela kanala bušotine, po pravilu, se postavlja u homogenoj stenskoj sredini sa srednjom čvrstoćom i malom abrazivnošću.

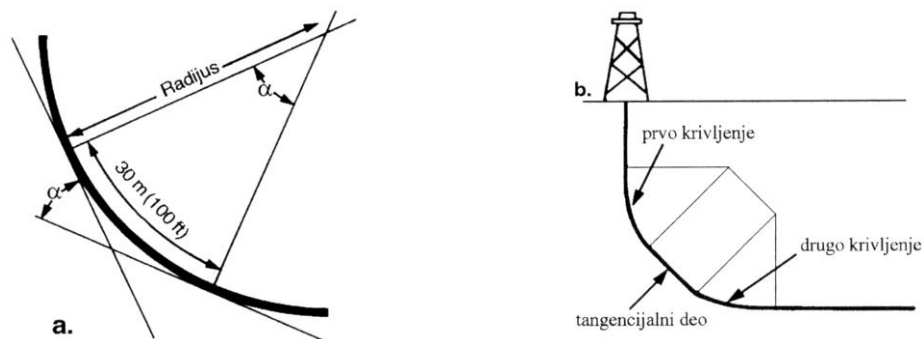
Deo bušotine koji je savijen povezuje vertikalni segment sa horizontalnim delom kanala bušotine. Ovaj segment oblikovan je kao luk sa definisanim radijusom krivljenja (videti sliku 5.3a). U određenim situacijama iz praktičnih razloga, ovaj savijeni deo može uključivati i pravolinijski tangencijalni segment (videti sliku 5.3b), koji povezuje dve tačke savijanja.



Slika 5.2 - Šematski prikaz konstrukcije horizontalne bušotine (Hrković, 2002)

Intenzitet krivljenja bušotine se izražava u stepenima po jedinici dužine i poznat je kao intenzitet savijanja, koji obično ostaje ispod $7^{\circ}/30\text{ m}$, uz inklinaciju od vertikale do 85° .

Mesto gde počinje horizontalni deo naziva se tačka "preloma" i definiše se putem koordinata x, y i z. Ova tačka se projektuje na krovini produktivnog sloja ili unutar samog produktivnog sloja.

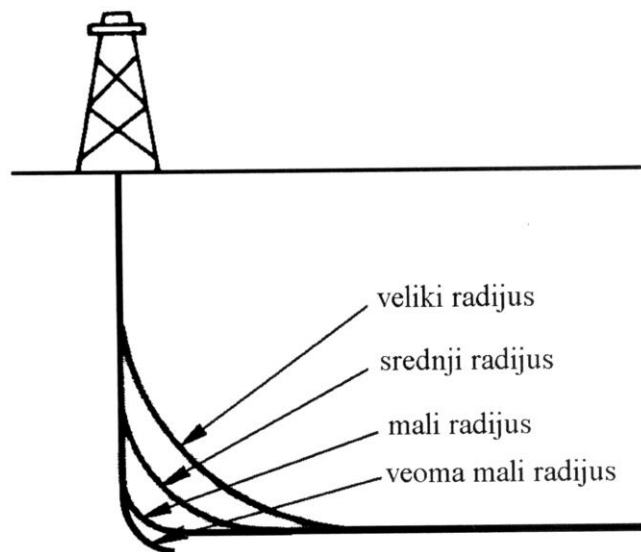


Slika 5.3 - Šematski prikaz iskrivljenog kanala bušotine: a) u obliku luka kruga, b) iskrivljeni deo kanala bušotine sa tangentom

Kanalski horizontalni deo se buši duž pružanja produktivnog sloja do tačke sa koordinatama x, y i z.

Usled karakteristika formacije kroz koju se buši i tehnika primenjenih u bušenju, horizontalni segment može biti blago zakrivljen nagore (sa povećanjem zenitnog ugla iznad 90°) ili nadole (sa smanjenjem ugla ispod 90°).

Prema veličini radijusa krivljenja horizontalne bušotine su klasifikovane u četiri osnovna tipa (slika 5.4) i to na bušotine sa velikim, srednjim, malim i sa veoma malim radijusom krivljenja.



Slika 5.4 - Šematski prikaz različitih radijusa krivljenja kanala bušotina

Horizontalne bušotine sa velikim radijusom krivljenja, u opsegu od 300 do 1000 m, koriste se za bušenje "grmova" kako na kopnu tako i na moru. Takođe se koriste za bušenje pojedinačnih bušotina sa većim odstupanjem od vertikale, pri dužini horizontalne sekcije od 600 do 1500 m. Najveći stepen zakrivljenosti iznosi $6^\circ - 18^\circ/100 \text{ m}$.

Prednost korišćenja bušotina sa velikim radijusom zakrivljenosti, u poređenju sa onima koje imaju manji i srednji radijus zakrivljenosti, je sposobnost postizanja horizontalnih kanala znatno veće dužine od 1500 m.

U modernom bušenju, **horizontalne bušotine sa srednjim radijusom zakrivljenosti** imaju najširu primenu, kako za bušenje pojedinačnih bušotina, tako i za postizanje produktivnosti eksploatacionih bušotina. Za ove bušotine, radijusi krivljenja variraju između 40 i 210 m, dok se maksimalni stepen krivljenja kreće od 2° do $15^\circ/10 \text{ m}$. Osim što su ekonomičnije zbog kraće dužine u poređenju sa bušotinama velikog radijusa zakrivljenosti, horizontalne bušotine sa srednjim radijusom omogućavaju precizno usmeravanje horizontalnog kanala bušotine do ciljne tačke. To je posebno bitno prilikom bušenja kroz slojeve nafte i gasa sa tankim debljinama..

Horizontalne bušotine sa malim radijusom zakrivljenosti, u opsegu od 6 do 12 metara, uspešno se koriste za bušenje iz prozora na eksploatacionoj koloni zaštitnih cevi ili kod bušenja u ležištima u poodmaklom stadijumu eksploatacije. Intenzitet krivljenja varira između $4,5^\circ$ i 9° po metru. Prelazak iz vertikalne u horizontalnu sekciju bušotine postiže se krivljenjem kanala dugih od 9 do 18 metara, a nakon što se postigne horizontalni pravac kanala, horizontalni kanal se prosečno buši u dužini od 135 metara (ređe, blizu 300 metara).

Kod **horizontalnih bušotina veoma malog radijusa krivljenja** intenzitet krivljenja je 45° - $60^\circ/0,3$ m. Ova tehnologija se koristi za izradu dopunskih kanala bušotine čija dužina horizontalnog dela kanala iznosi 30 do 60 m.

5.2 Profili horizontalnih bušotina

Nasuprot bušotinama koje poprečno presecaju produktivni sloj, horizontalne bušotine otvaraju naftonosne, gasne i vodonosne slojeve kanalom bušotine orijentisanim u pravcu produktivnog sloja.

Zavisno od heterogenosti i moćnosti litološkog sastava ležišta, rasporeda stena po tvrdoći i stabilnosti, kao i eksploatacionih karakteristika ležišta, određuju se dimenzije, oblik (geometrija) i pravac bušotine. Kada je reč o broju kanala, horizontalne bušotine se klasifikuju kao:

- jednokanalne;
- višekanalne.

5.2.1 Profili jednokanalnih horizontalnih bušotina

Jednokanalni profili horizontalnih bušotina mogu se podeliti na dva međusobno povezana dela:

- usmeravajući deo i
- horizontalni deo.

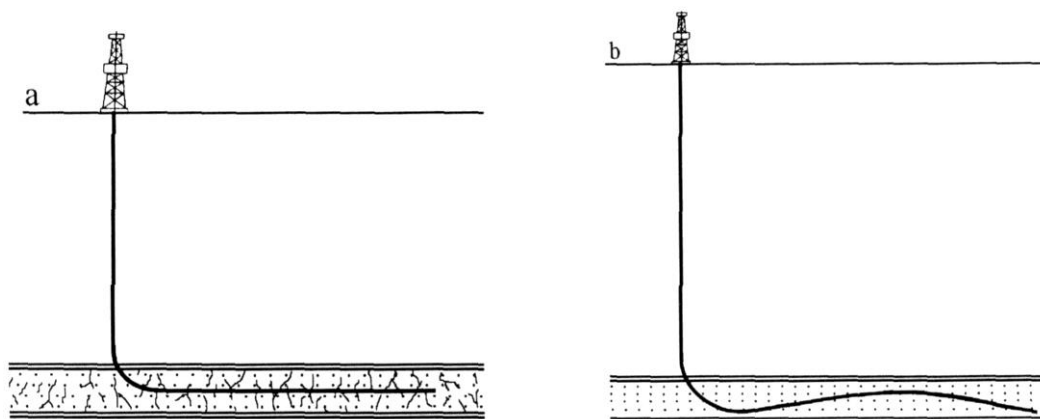
Interval kanala bušotine od usta bušotine do tačke gde horizontalni deo kanala počinje predstavlja usmeravajući deo. Vertikalni, krivolinijski i prema potrebi tangencijalni deo čine ovaj usmeravajući deo.

Geometrija profila horizontalnih bušotina usmeravajućeg dela varira u skladu sa:

- geološkim uslovima bušenja, strukturnom građom i litološkim sastavom stena iznad produktivnog sloja,
- dužinom horizontalnog segmenta,
- statičkim nivoom sloja,
- potencijalom produktivnog sloja,
- mogućnostima primene tehnologija za horizontalno bušenje i slično.

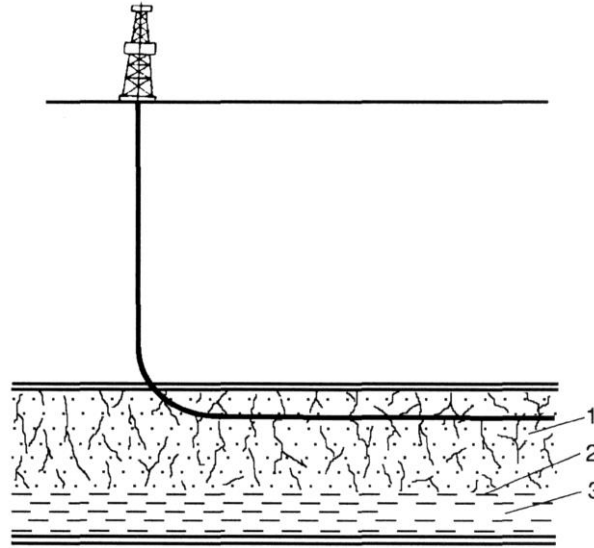
U skladu sa strukturnim karakteristikama, moćnosti i nagibom produktivnog sloja, horizontalna sekcija bušotine se projektuje paralelno sa slojevima ili pod manjim nagibom. Homogeni slojevi se obično buše paralelno sa svojom krovinom, dok se slojevi sa više uzdužnih slojeva obično presecaju pod blagim nagibom. Što se tiče oblika, kanali mogu biti ravni (horizontalni), blago nagnuti, ispupčeni ili talasasti.

U slojevima na dubinama do 800 m koji imaju manju moćnost (5-7 m), ili u slojevima na dubini od 800-2000 m čija je moćnost 10-15m, bušenje horizontalne sekcije kanala bušotine se vrši paralelno sa podinom ili krovinom sloja ili pod blagim nagibom (slika 5.5).



Slika 5.5 – a) Šema pozicije horizontalnog pravolinijskog kanala bušotine u produktivnom sloju male moćnosti, b) blago ispupčenog kanala u produktivnom sloju male moćnosti (Steiner, 1994)

U slabo propustljivim slojevima veće moćnosti sa izraženom vertikalnom ispućalošću i aktivnom vodom u podini, horizontalni deo bušotine izvodi se paralelno krovini sloja (slika 5.6). Takav profil bušotine preseca znatno veći broj produktivnih vertikalnih pukotina. Osim toga, zahvaljujući većoj površini filtracije moguća je eksploatacija sa manjom depresijom u cilju sprečavanja prodora vode u pukotine. Ako se horizontalni deo buši po sredini produktivnog sloja, horizontalni deo bušotine izvodi se s blagim ispupčenjem koje se ostvaruje malim intenzitetom smanjenja ugla krivljenja (Steiner, 1994).



Slika 5.6 - Otvaranje produktivnog sloja sa izraženom vertikalnom ispucalošću: 1.Nftonosni sloj; 2.Kontakt voda-nafta; 3.Vodena zona

5.2.2 Profili višekanalnih horizontalnih bušotina

Principijelna šema višekanalnog otvaranja ležišta podrazumeva bušotinu gde se dopunski kanali razgranavaju iz osnovnog kanala u različitim pravcima. Višekanalnim bušotinama smatraju se one koje se u nižem delu osnovnog kanala prostorno račvaju u obliku dva ili više horizontalna, blago nagnuta ili talasasta kanala. U ovom slučaju, eksploatacija nafte se ostvaruje kroz osnovni kanal, dok se nafta preusmerava u osnovni kanal iz perifernih zona ležišta kroz dopunske (drenažne) kanale. Paralelno tome, dopunski kanali služe za otvaranje visoko produktivnih pukotina i sočiva.

Na polju Baškira, 1953. godine, u Rusiji, izbušena je prva višekanalna bušotina. Glavna bušotina, poznata i kao matična bušotina, sadržala je 9 bočnih kanala. Ovo je dovelo do značajnog povećanja kontakta između bušotine i ležišta za 5,5 puta uz istovremeno povećanje proizvodnje od 17 puta. Interesantno je da se cena celokupne bušotine povećala samo 1,5 puta u odnosu na izradu glavnog kanala (Bosworth et al., 1998).

Do sada je tehnologija bušenja dopunskih kanala višekanalnih horizontalnih bušotina različitih oblika grananja (najčešće malog radijusa i uz primenu tubinga) značajno unapređena.

Geološke karakteristike određenog profila, zahtevi razrade i eksploatacije, tehničke mogućnosti bušenja, zaštita kanala bušotine, kao i održavanje i popravka višekanalnih bušotina, predstavljaju osnov za odabir oblika višekanalnih horizontalnih bušotina, kao i za koso-usmerene bušotine.

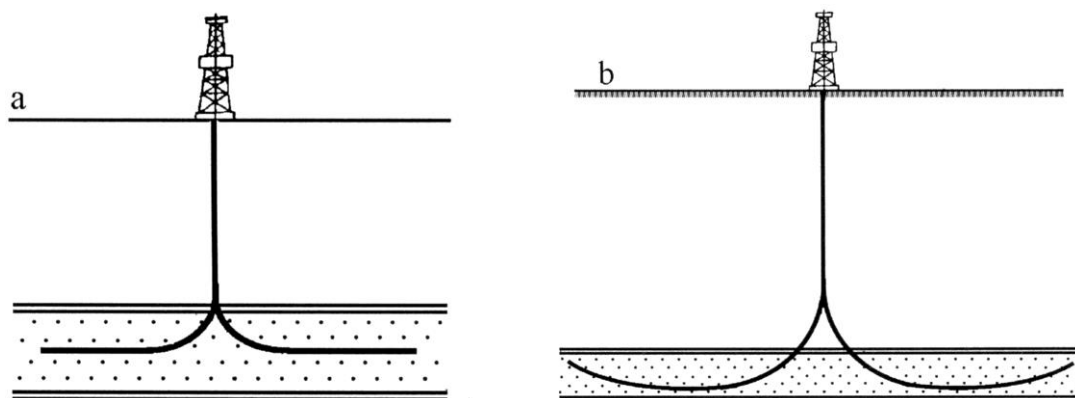
S obzirom na raznolikost tipova višekanalnih bušotina, teško je postaviti opštu i univerzalnu klasifikaciju. Međutim, fokusirajući se samo na geometriju sistema višekanalnih bušotina, mogu se identifikovati sledeći tipovi:

- Jednoredne višekanalne bušotine sa horizontalnim ili blago nagnutim dopunskim kanalima, koje se buše iz osnovnog vertikalnog kanala na jednom nivou.
- Višeredne višekanalne bušotine, gde se iz osnovnog vertikalnog kanala na različitim nivoima buše horizontalni dopunski kanali ili dopunski kanali sa blagim nagibom.
- Radijalno razgranate horizontalne bušotine, gde se iz osnovnog horizontalnog kanala buši sistem radijalnih dopunskih kanala.

Obično se buše jednoredne višekanalne bušotine sa horizontalnim ili blago nagnutim kanalima za razradu ležišta nafte sa niskim slojnim pritiskom, ležišta visokoviskozne nafte, slojevitih produktivnih zona, ležišta koja su već znatno razrađena, kao i za degazaciju slojeva ugljeva.

Višekanalne bušotine sa horizontalnim ili blago nagnutim dopunskim kanalima se koriste na naftnim ležištima čiji su produktivni slojevi široki od nekoliko metara do nekoliko desetina (ponekad čak i stotina) metara, koji su horizontalno položeni ili blago nagnuti. Ležišta se međusobno razlikuju po

heterogenosti; dok su neka homogena, druga imaju jasno izraženu slojevitost strukturu, a treća se odlikuju značajnom zonalnom heterogenošću i tako dalje.

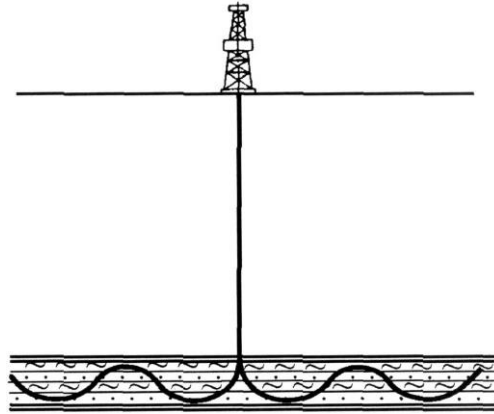


Slika 5.7 – Profil višekanalne jednoredne bušotine sa vertikalnim osnovnim kanalom i: a) horizontalnim dopunskim kanalima, b) blago ugnutim dopunskim kanalima

Razvijanje standardnih profila višekanalnih bušotina je izazovno zbog raznolikosti geoloških i eksploatacionih uslova ležišta. Stoga se projekti takvih bušotina obično izrađuju individualno, prilagođavajući se specifičnim zahtevima svakog ležišta.

Na slici 5.7a ilustrovana je šema višekanalne bušotine sa horizontalnim dodatnim kanalima u slojevitom ležištu koje sadrži homogeni sloj. Kanali višekanalne bušotine se pozicioniraju u sredini sloja u skladu s njegovom debljinom. U ležištima sa gravitacionim režimom poželjno je da profili dopunskih kanala u nižem delu sloja imaju blago ulegnut oblik (slika 5.7b), odnosno da se kanali podižu u gornji deo sloja.

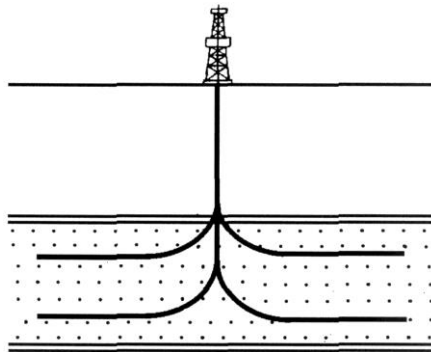
U slojevitom ili znatno heterogenom sloju dopunski kanali višekanalnih jednorednih bušotina mogu imati oblik talasa (slika 5.8).



Slika 5.8 - Profil višekanalne jednoredne bušotine sa dopunskim kanalima u obliku talasa

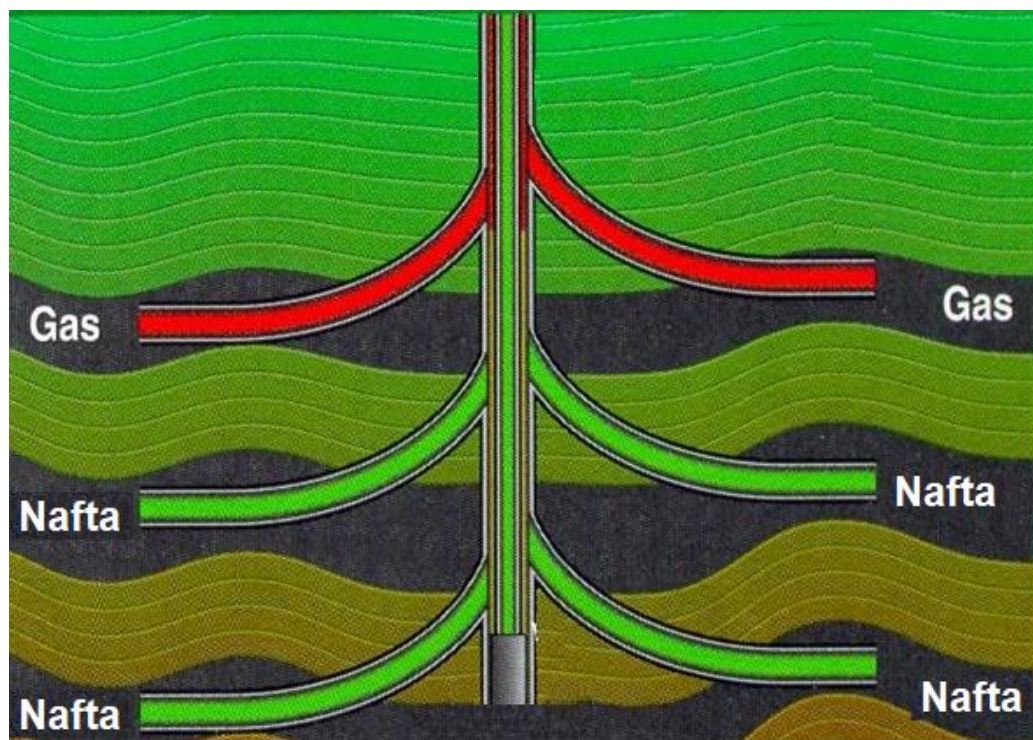
Višeredne višekanalne horizontalne bušotine primenjuju se za slojeve veće moćnosti (100 m i više). Za različite modele razrade ležišta, izradjuju se dva do tri reda horizontalnih dopunskih kanala. U svakom redu buše se tri do četiri dopunska kanala. Takve bušotine mogu se uspešno primeniti za razradu ležišta sa visokoviskoznom naftom.

Višeredne dvosmerne bušotine (slika 5.9) mogu se primenjivati za ravnomerno obuhvatanje sloja drenažom pri šemi vertikalnog protoka odozdo prema gore. Za bolju drenažu sloja, pravci dopunskih kanala u planu, u različitim nivoima, ne poklapaju se.



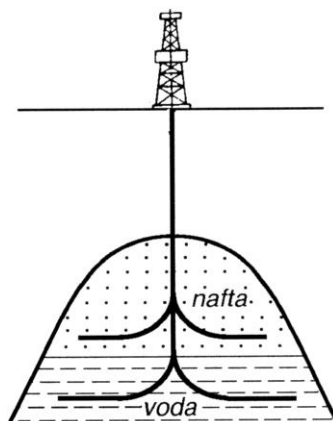
Slika 5.9 - Profil višekanalne dvoredne bušotine

Višeredne bušotine s horizontalnim kanalima preporučuju se za razradu ležišta sa gasnom kapom i vodom. U tom slučaju gornji red kanala (tri do četiri kanala) buše se u zoni gasne kape, dok se donji redovi dopunskih kanala buše u naftnoj zoni (slika 5.10).



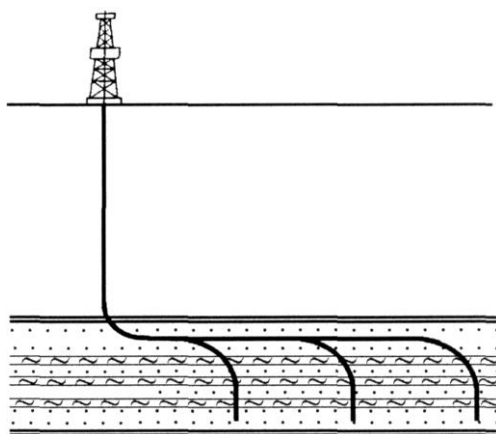
Slika 5.10 - Profil višeredne horizontalne bušotine za otvaranje ležišta nafte i gasa (<https://pet-oil.blogspot.com/2011/06/multi-lateral-drilling.html>)

Eksploatacija takvih bušotina zahteva primenu pakera izmedju redova kanala. Takvi profili višerednih bušotina mogu se primenjivati na ležištima sa vodom u podini, za borbu s kupama vode u podini i za ostvarivanje šema vertikalnog istiskivanja nafte (slika 5.11).



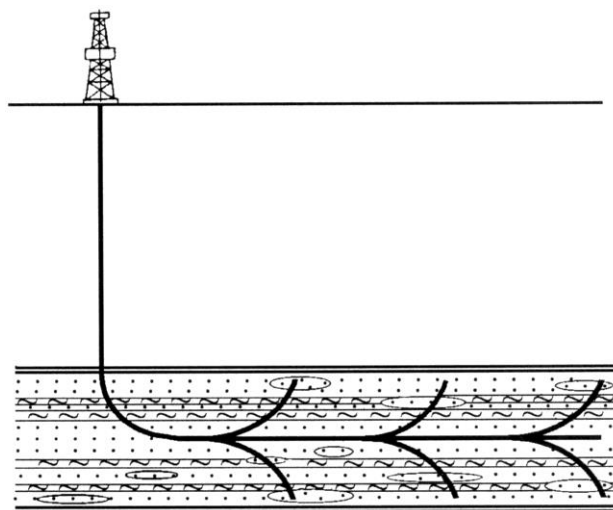
Slika 5.11 - Profil višeredne horizontalne bušotine za otvaranje ležišta nafte sa aktivnom vodom u podini produktivnog sloja

Radijalno razgranate horizontalne bušotine izvode se iz horizontalnog osnovnog kanala. Dubine na kojima se buši osnovni horizontalni kanal bušotine su 300-3000 m, sa dužinom do 900 m. Ako je najproduktivniji i najmoćniji deo sloja naftnog ležišta u gornjem delu, sa uspehom se može primeniti profil višekanalne radijalne bušotine (sika. 5.12). Osnovni, horizontalni profil višekanalnu bušotine je u gornjem delu sloja a njegovo dno, kao i svi dopunski kanali otvaraju produktivne slojeve manje moćnosti do njegove podine.



Slika 5.12 - Profil radijalno-horizontalne bušotine sa radijalnim kanalima u vertikalnoj ravni

Medjutim, ako je najproduktivniji deo sloja razmešten u srednjem delu produktivne zone veće moćnosti, može se primeniti profil bušotine prikazan na slika 5.13.



Slika 5.13 - Profili radijalno horizontalnih bušotina sa razmeštajem dopunskih radijalnih kanala u vertikalnoj ravni usmerenih prema krovini i podini produktivne zone

5.3 Proračun trajektorije horizontalne bušotine

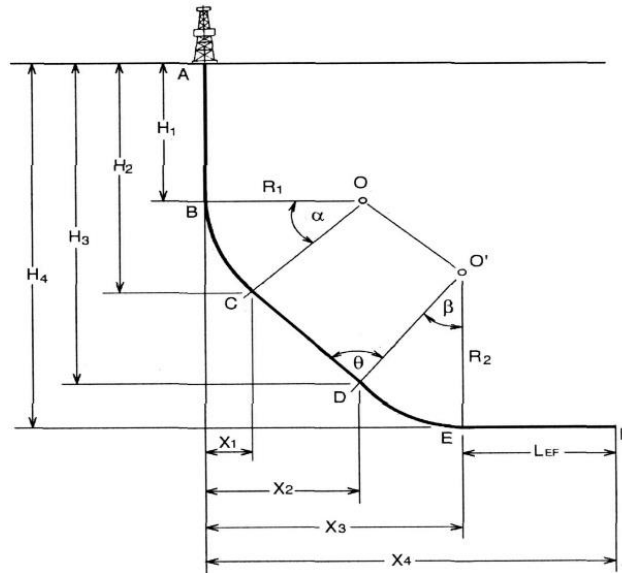
Profili horizontalnih bušotina sastavljeni su iz usmeravajućeg i horizontalnog dela. Kao primer, za proračun je uzet profil horizontalne bušotine kod koga usmeravajući deo uključuje: vertikalni interval; deo početnog krivljenja sa ravnomernim podizanjem zenitnog ugla; tangencijalni interval i deo drugog krivljenja sa ravnomernim podizanjem zenitnog ugla do 90° , odakle počinje horizontalni interval.

U skladu sa slikom 5.14, za proračun su uzeti sledeći parametri i oznake karakterističnih tačaka:

A - ulaz bušotine

B - tačka početka prvog krivljenja

- C - kraj prvog krivljenja i početak tangente
- D - kraj tangente i početak drugog krivljenja
- E - kraj drugog krivljenja i početak horizontalnog dela
- F - krajnja ciljna tačka



Slika 5.14 - Trajektorija horizontalne bušotine sa dva zakrivljena dela i tangentom

Parametri za proračun:

H1 - dubina vertikalnog dela kanala bušotine (dubina tačke B)

H2 - dubina tačke C

H3 - dubina tačke D

H4 - dubina tačke E i F

X1 - odklon tačke C

X2 - odklon tačke D

X3 - odklon tačke F (krajnje ciljne tačke)

R1 - radijus prvog krivljenja

R2 - radijus drugog krivljenja (u ovom slučaju $R1 = R2$)

α - ugao odklona tačke C

β - ugao drugog krivljenja: $\beta = 90^\circ - \alpha$

$\theta = 90^\circ$

LAB - dužina vertikalnog dela (od tačke A do tačke B)

LAC – dužina od tačke A do tačke C

LAD - dužina od tačke A do tačke D

LAE - dužina od tačke A do tačke E

LAF - dužina od tačke A do tačke F (ukupna dužina bušotine)

LEF - dužina horizontalnog kanala bušotine

Proračun:

Na osnovu ovih veličina izračunava se vertikalni deo kanala bušotine (H_1) koji se graniči tačkama A i B. Za proračun se primenjuje sledeća jednačina:

$$H_1 = H_4 - R \cdot \sin \alpha - CD \cdot \cos \alpha - R \cdot (1 - \sin \alpha) = H_4 - R - CD \cdot \cos \alpha \quad (5.5)$$

Ova jednačina može se primeniti u slučajevima kada je $\alpha + \beta = 90^\circ$, t.j. pri prelazu iz potpuno vertikalnog u potpuno horizontalan položaj putanje bušotine.

Dubina prelaza iz zakrivljenog dela kanala u tangencijalno usmereni kanal bušotine (H_1) je:

$$H_2 = H_1 + R \cdot \sin \alpha \quad (5.6)$$

a vertikalna dubina tačke C od ulaza bušotine, X_1

$$X_1 = R - R \cdot \cos \alpha \quad (5.7)$$

Dubina prelaza iz tangencijalne u zakrivljenu putanju bušotine (H_3) je:

$$H_3 = H_2 + CD \cdot \cos \alpha \quad (5.8)$$

a, horizontalna udaljenost tačke D od ulaza bušotine, X_2

$$X_2 = X_1 + CD \cdot \sin \alpha \quad (5.9)$$

Dubina prelaza iz zakrivljenog u horizontalni kanal bušotine, (H_4) je:

$$H_4 = H_3 - R \cdot \sin \alpha + R \quad (5.10)$$

a horizontalna udaljenost tačke E od ulaza bušotine, X_3 :

$$X_3 = X_2 + \cos \alpha \quad (5.11)$$

Lateralna dubina (X_4) se postiže uz pomoć horizontalnog kanala od tačke E do tačke F, odnosno dužinom horizontalnog kanala bušotine (L_{EF}):

$$L_{EF} = X_4 - X_3 \quad (5.12)$$

5.4 Izrada i sklopovi bušačkog pribora horizontalnih bušotina

U većini slučajeva horizontalne bušotine se izrađuju kao produžetak vertikalnih, dok se retko izrađuju kao produžetak koso-usmerenih bušotina. Vertikalni segment bušotine se pravi konvencionalnom tehnikom, dok se od tačke skretanja koriste specifični kompleti bušačke opreme.

Izbor pribora za izradu krivolinijskog dela bušotine u koso-usmerenom i horizontalnom bušenju zavisi od specifičnih karakteristika produktivnog sloja, geoloških i strukturnih osobina pojedinih formacija, kao i od stepena krivine.

5.4.1 Izrada i sklopovi za bušenje bušotina veoma malih radijusa

Skretanje u ovim bušotinama izvodi se po pravilu iz ranije izradjene vertikalne ili koso-usmerene bušotine sa izabranog mesta iznad dna bušotine. Takve bušotine izuzetno se izrađuju i u delimično iscrpljenim ležištima. U ciljanoj zoni se izradi proširenje, ili se proširi postojeća bušotina, duboko 2 do 3 m i široko oko 0,6 m radi postavljanja hidrauličkog podupirača, neophodnog za skretanje u ovom tipu bušotina. Dno bušotine mora biti u dovoljno čvrstom podinskom sloju, ali ako stene podine nisu čvrste, vrši se cementacija dna proširenja. Na dnu niza standardnih bušaćih šipki koji dopire do iznad tačke skretanja, navrću se uzlazne cevi (tubing), najčešće savitljivih, prečnika između 0,032 i 0,064 m (1 ¼ do 2 ¼ inča), dugačke 30 do 60 m, u zavisnosti od željene dužine horizontalnog kanala bušotine.

Na dno tubinga navrće se posebno konstruisana bušaća glava s mlaznicom koja se podigne u horizontalan položaj i usmeri u željenom pravcu. Delovanjem mlaza isplake (u svojstvu isplake može se primeniti i voda) i potiskivanja (bez rotacije) tubinga sa bušotinskom glavom izradi se horizontalni kanal bušotine. U završenim horizontalnim bušotinama vrši se perforiranje (napucavanje) tubinga, koji se zatim odvaja kod mesta skretanja i ostavlja se u zakrivljenom i horizontalnom kanalu bušotine. U slučajevima kada se iz produktivne naslage očekuje veliki prodor peska u perforirani, horizontalno postavljeni tubing utiskuje se nasip šljunka.

Prednosti primene horizontalne bušotine sa izuzetno malim radijusom su mogućnost skretanja u području produktivnih naslaga i/ili u plitkim ležištima fluida; mogućnost zrakaste izrade više horizontalnih kanala iz istog proširenja; mogućnost izrade iz postojećih vertikalnih ili koso-usmerenih bušotina i dr. Međutim, kod ovog tipa bušotina ima i određenih nedostataka kao što su: nagle

promene otklona na mestu skretanja; nemogućnost primene u čvrstim stenama; mala dužina horizontalnog kanala bušotine; nemogućnost jezgrovanja i geofizičkih merenja; složena priprema i izvodjenje skretanja.

5.4.2 Izrada i sklopovi za bušenje bušotina malih radijusa

U ovom tipu bušotina lokacija skretanja se može nalaziti unutar kolone zaštitnih cevi ili u zoni ispod ugrađenih cevi u nezacevljenom delu kanala bušotine, poznatom kao "open hole". Kada se skretanje dešava unutar zacevljenog dela, bočni otvor (poznat kao prozor) se formira glodanjem sa dužinom od otprilike 6 m. U slučaju da se planira skretanje u otvorenom delu kanala, vertikalni kanal bušotine mora se produbiti ili produžiti za takođe 6 m. Prozor u zaštitnim cevima, odnosno produbljeni kanal bušotine koristi se da se kroz njega spuštaju i postavljaju odgovarajući pakeri sa klinom za skretanje (Bizjak 2004).

Povećanje ugla skretanja od $5,5^\circ$ do 9° po metru može se izvesti na sledeće načine:

- Korišćenjem sistema "Top Driving Drilling" za rotaciono bušenje;
- Korišćenjem dubinskih (vijčanih) motora;
- Primenom mlaznog, erozionog bušenja.

Horizontalni deo kanala bušotine može se učvrstiti instalacijom perforirane izgubljene kolone zaštitnih cevi ("liner"), ili ostaviti nezakrivljen kao "open hole".

Za izradu ovakvih bušotina putem "rotary" sistema bušenja, koriste se tri različita sklopa alata:

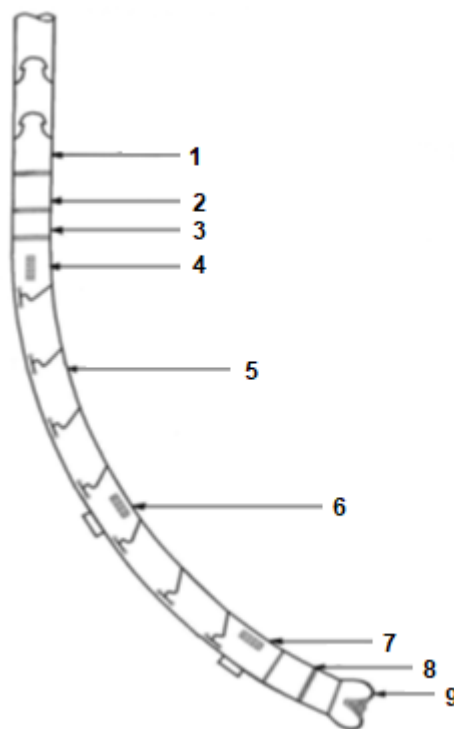
- Sklop za usmeravanje sa pakerom;
- Sklop za povećanje ugla skretanja (za usmeravanje u kosom delu bušotine);
- Sklop za održavanje postignutog ugla skretanja.

Za izradu ovog tipa bušotine primenjuje se sledeći sklop pribora (slika 3.15):

Sklop za usmereno vođenje s pakerom čini kućište koje je sačinjeno od pakera i klina. Parker je standardne konstrukcije i može se aktivirati (naduvati) u

otvorenom kanalu bušotine ili unutar kolone zaštitnih cevi kroz isečeni bočni otvor. Konstrukcija spajanja klina u istom kućištu s pakerom omogućava aktiviranje pakera na željenom mestu i to jednim spuštanjem bušačkog pribora, te usmeravanje lica klina u željenom smeru posle čega počinje bušenje na krivljenju kanala bušotine.

Radi smeštaja kućišta i aktiviranja pakera, potreban je vertikalni ili kosi kanal do ispod nivoa ciljane naslage.



Slika 5.15 - Sklop kojim se postiže ugao krivljenja malog radijusa. 1) savitljiva pogonska zglobna šipka (rotirajuća), 2) rotirajući prelaz, 3) zaptivni sklop, 4) stabilizer, 5) kosa vodilica (nerotirajuća), 6) stabilizer, 7) stabilizer, 8) dleto (Steiner, 2014)

Sklop za povećanje ugla otklona predstavlja bitan sastavni deo pribora za postizanje horizontalnih bušotina malog radijusa krivljenja. Njima se kanal bušotine povija iz vertikalnog u horizontalni položaj. Sastoji se od dva dela:

- savitljive pogonske šipke koja prisiljava dleto da pod uticajem rotacije i pritiskanja vertikalnog niza pribora zakrivi bušotinu prema horizontalnom položaju,
- iskrivljene vodilice koja se sastoji od nerotirajućeg kućišta, prednapregnutog za postizanje željenog radijusa zakrivljenja, unutrašnjeg pogonskog vretena koje prenosi rotaciju vertikalnog niza pribora na dleto, zatim od sklopova za zaptivanje koji imaju ležajeve na dnu i vrhu čije je uloga da povežu nerotirajuće kućište sa rotirajućim vretenom.

Iskrivljena vodilica se upotrebljava u sklopu pribora za bušenje jedino u procesu bušenja do postizanja horizontalnog otklona. Kada se taj otklon postigne, pribor se izvlači, iskrivljena vodilica se odlaže i u bušotinu se spušta sklop za održavanje ugla otklona.

U bušotinu se spušta sastav alata za održavanje ugla otklona (nakon sastava alata za povećanje ugla otklona), a sastoji se od mnogobrojnih povezanih savitljivih zglobnih šipki i ugrađenih stabilizera. Neposredno iznad dleta se postavljaju stabilizeri različitih prečnika koji omogućavaju smanjenje ili povećanje ugla otklona u skladu sa željenom trajektorijom kanala bušotine. Za alate većeg prečnika koriste se nerotirajući stabilizeri, dok se za one manjeg prečnika stabilizeri okreću zajedno sa ostalim cevnim alatima (Bizjak 2004).

5.4.3 Izrada i sklopovi za bušenje bušotina srednjih radijusa

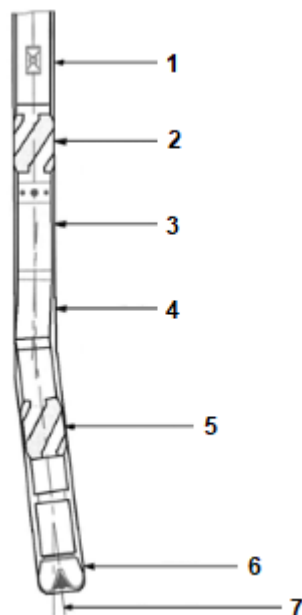
Tokom kreiranja radijusa krivine, mesto skretanja se odredi nekoliko metara iznad optimalne tačke namenjene luku kruga odabranog radijusa krivine. Nakon postizanja ugla skretanja od otprilike 45° , vrši se kontrolno merenje, proračunava se korekcija, a dobijena dužina korekcije buši se uz primenu tangente.

Nakon što se dostigne određena dužina tangente, nastavlja se sa povećanjem ugla skretanja do željenog nagiba, odnosno do otprilike 90° . Na ovaj način postiže se precizno usmeravanje kanala bušotine ka cilju.

U procesu izrade bušotina koja ima srednji radijus krivljenja, kada se dovrši vertikalni kanal bušotine, nastavljanje zakrivljenog dela bušotine se vrši dubinskim motorima. Pri izradi zakrivljenog dela bušotina na određenom rastojanju postavljaju se dva stabilizera, jedan iznad dleta, a drugi na gornjem kraju sklopa za izradu krivine. Kao što se vidi sa slike 5.16, tačke gde su postavljeni dleto i gornji i donji stabilizer ne leže na pravoj liniji već se međusobno mogu povezati lukom kruga koji određuje ugao krivljenja koji se ostvaruje ovim sastavom i rasporedom pribora. Između donjeg stabilizera i dubinskog motora obavezno se postavljaju krivi prelazi. Zavisno od potrebnog ugla krivljenja, iznad gornjeg stabilizera postavljaju se teške bušaće šipke.

PDC dleta se upotrebljavaju za bušenje i formiranje krivine i horizontalnog dela kanala bušotine, ali je važno da profili ovih dleta imaju adekvatan profil radi prilagođavanja putanji bušotine. Ugao pod kojim je dleto zakošeno, omogućava upravljivost kompozicije alata, kao i prelazak iz režima građenja ugla u održavanje postignutog ugla. Dleta, donji stabilizer, prelaz, vijčani motor i gornji stabilizer čine upravljački sklop koji se koristi kako za korekciju ugla skretanja, tako i za horizontalno bušenje.

Kod sklopova za izradu bušotina koje imaju srednji radijus krivljenja veoma je važno da se može njima upravljati pomoću telemetrijskog sistema. Telemetrija, osim ugla otklona i azimuta kanala bušotine, kao i njene dužine, daje podatke i o nuklearnom karotažu (gamma ray), otporu stena i drugim svojstvima stena kroz koje se buši.



Slika 5.16 - Alat za izradu kanala bušotine srednjeg radijusa krivine: 1) MWD, 2) stabilizer, 3) dubinski motor, 4) spojnica sa dvostrukim zakošenjem, 5) sklop ležajeva sa stabilizerom, 6) dleto, 7) ugao nagiba dleta

Bušotine srednjeg radijusa zakrivljenja mogu se izradjivati dletima dovoljno velikog prečnika, pa se te bušotine mogu snimati i meriti standardnim geofizičkim metodama i zatim zaštititi bušotinu kolonama zaštitnih cevi.

Prednosti primene ovog tipa bušotina su u tome što omogućavaju dovodjenje horizontalnog dela kanala bušotine u zadatu tačku sa velikom tačnošću, što je posebno važno kod bušenja kroz produktivne slojeve male moćnosti. Ovo je uslovalo da bušotine sa srednjim radijusom danas imaju najširu primenu u svetu.

5.4.4 Izrada i sklopovi za bušenje bušotina velikih radijusa

Bušotine ovog tipa se obično formiraju kombinovanjem rotari bušenja i dubinskih motora. U poređenju sa bušotinama srednjeg radijusa krivine, glavna prednost ovih bušotina leži u opštoj upotrebi alata koji se koristi i za vertikalne bušotine (bez ograničenja u spoljašnjem prečniku) i u sposobnosti da se

postignu horizontalne dužine kanala preko nekoliko hiljada metara. Pravolinijske trase kanala se formiraju rotari bušenjem, dok se veći otkloni postižu dubinskim motorima koji su ključni deo skupa alata (PetroWiki, 2016a).

Konvencionalno, skretanje se postiže pomoću krivog prelaza iznad dubinskog motora kako bi se povećao ugao otklona. Za dostizanje ugla otklona do $4,1^{\circ}/10$ m, koriste se i teške šipke opremljene stabilizerima ili teške bušaće šipke. Pri ovom procesu izrade bušotina često je neophodno promeniti konfiguraciju bušaćkog pribora između 5 i 13 puta, što rezultira produženim vremenom i visokim troškovima izrade bušotine.

Sklopom za povećanje ugla otklona s navigacionim bušaćim sastavom obično se izrađuju zakrivljeni delovi kanala bušotine prečnika 0,311 m ($12 \frac{1}{4}$ inča). Iznad dleta se postavlja vijčani motor prečnika 0,203 m (8 inča), iznad dubinskog motora postavlja se krivi prelaz sa dvostrukim zakošenjem otklona $0,74^{\circ}$ i telemetrijski uređaj prečnika 0,203 m (8 inča). Sklop omogućava povećanje ugla otklona do $1,96^{\circ}/10$ m. U izuzetnim slučajevima je moguće i veće povećanje ugla otklona, a moguće su i nagle promene ugla otklona i azimuta i do $3,1^{\circ}/10$ m.

Kod **konvencionalnog sastava pribora u sklopu za izradu horizontalnog dela kanala bušotine** se iznad dleta postavlja dubinski motor, najčešće vijčani, zatim krivi prelaz sa zakošenjem do 1° . Tim zakošenjem se poništava smanjenje ugla otklona, koji može nastati usled smanjenja opterećenja na dleto. U procesu bušenja, naročito u formacijama sa različitom geološkom građom, neophodna je česta kontrola putanje kanala bušotine i promena sastava u sklopu bušaćeg pribora i do 8 puta.

Kod **sklopa pribora za horizontalnu putanju sa navigacionim sastavom** za održavanje horizontalnog položaja putanje ili vraćanja u slučaju odstupanja, u putanju se kao i za smanjenje broja manevara radi promene sastava

pribora, iznad dleta postavlja vijčani motor, zatim dva kriva prelaza i telemetrijski uređaj.

5.4.5 Dozvoljene dužine pribora u zakrivljenom kanalu

bušotine

U procesu formiranja zakrivljenog dela bušotine ključno je utvrditi maksimalnu dužinu i prečnik alata koji se koristi za oblikovanje zakrivljenog segmenta. Tokom ovog procesa koji obično karakteriše konzistentno savijanje kanala bušotine duž celog luka, alat koji se nalazi unutar zakrivljenog kanala bušotine podložen je određenom savijanju. To posebno važi za donji deo alata koji je izložen trenju usled kontakta sa zidom bušotine. Međutim, nije svaki alat u sklopu bušačkog pribora fleksibilan (na primer, dubinski motori i telemetrijski uređaji), pa je neophodno precizno odrediti radijus krivljenja bušotine ili ograničenje u prečniku i dužini nepomičnog alata.

Na slici 5.17 prikazan je: pribor prečnika (d) koji je postavljen u krivini bušotine prečnika (D) i radijus krivljenja (R), maksimalna i minimalna dužina tog pribora kao i maksimalni i minimalni radijus krivljenja. Da bi se pribor mogao primeniti u procesu izrade krivine, izračunava se primenom sledećih jednačina:

$$L_{\max} = 2 \cdot \sqrt{D^2 - d^2 + 2R \cdot (D - d)} \quad (5.13)$$

$$R_{\min} = \frac{L^2 + 4 \cdot (D^2 - d^2)}{8 \cdot (D^2 - d^2)} \quad (5.14)$$

Gde su:

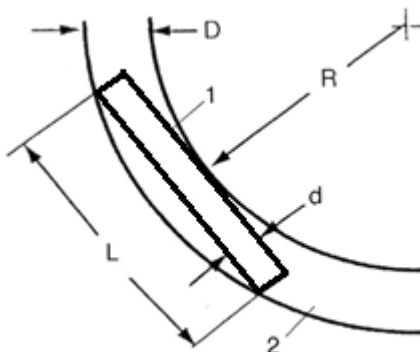
$L_{\max}$ - maksimalna dozvoljena dužina krutog pribora (m)

D - prečnik kanala bušotine (m)

d - prečnik krutog pribora (m)

$R_{\min}$ - minimalni prečnik krivljenja bušotine (m)

L – stvarna dužina krutog pribora (m)



Slika 5.17 - Proračun dozvoljene dužine pribora u zakrivljenoj putanji kanala bušotine: 1. Kruti pribor u krivini bušotine; 2. Zakrivljeni deo kanala bušotine

5.5 Uređaj za kontrolno merenje u procesu izrade bušotine

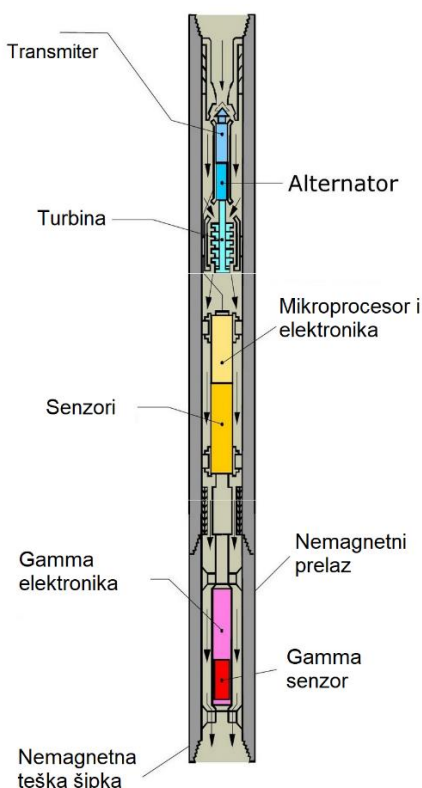
U procesu izrade horizontalnih bušotina moraju se poznavati veličine ugla otklona (zenitnog ugla) i smera (azimuta) kanala bušotine. Za tu svrhu primenjuju se različiti telemetrijski uređaji koji omogućavaju gotovo trenutnu vezu mernih uređaja na dnu bušotine sa uređajima na površini. Jedan od tipičnih telemetrijskih uređaja koji je veoma pouzdan i ekonomičan u radu pri različitim uslovima bušenja predstavlja MWD (Measuring While Drilling) sisem (Desbrandes, 1990).

Osnovna koncepcija za korišćenje uređaja koji omogućava neprekidno merenje tokom bušenja jeste stvaranje gotovo trenutne veze između dna bušotine, gde se u kompoziciji bušačeg alata, odnosno u nemagnetnoj teškoj šipki nalaze sklopovi mernih instrumenata, i površine, gde se nalazi operater sa odgovarajućim delovima opreme (Bizjak 2004).

Ceo MWD sistem pribora koji se primenjuje za vođenje i kontinuirano merenje u procesu izrade horizontalnih bušotina sačinjavaju:

- telemetrijski merni uređaj (predajnik) smešten u nemagnetnoj teškoj šipki, koja se nalazi iznad dubinskog motora i krivog prelaza,
- uređaji smešteni na površini (prijemnici),
- uređaji koji prenose signal sa dna bušotine na površinu (pulsator-predajnik).

Na slici 5.18 dat je primer telemetrijskog mernog uređaja koji se sastoji od senzora, pribora za stvaranje signala i energetskog izvora. Posle provere ispravnosti uređaj se postavlja u nemagnetnu tešku šipku iznad dleta.



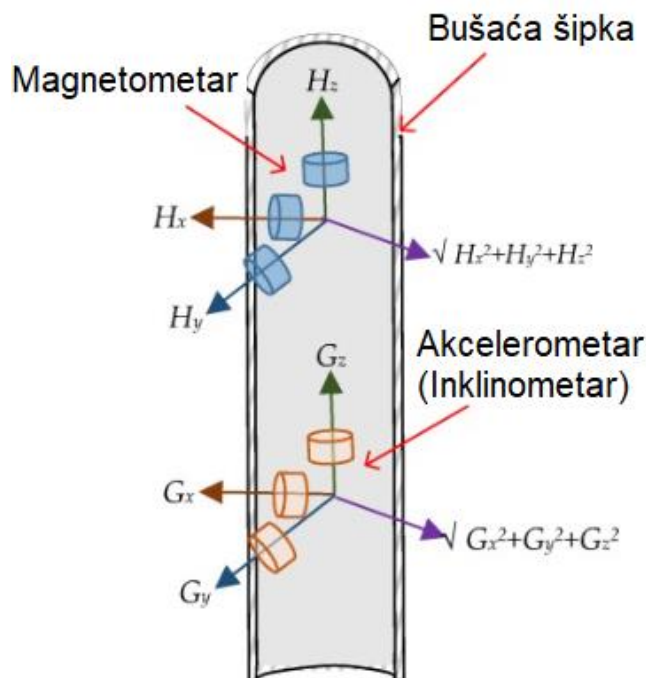
Slika 5.18 - Prikaz konstrukcije MWD uređaja

(<https://directionaldrilling.blogspot.com/2011/07/21-measurement-while-drilling-mwd-and.html>)

Telemetrijski merni uređaj obuhvata senzor kao integralnu komponentu koja se sastoji od sledećih delova (slika 5.19): tri magnetometra (H_x , H_y i H_z) smeštena su u gornjem delu senzorskog kućišta i koriste se za merenje azimuta, odnosno

smera bušotine, pomoću zavojnica. U donjem delu kućišta senzora, nalaze se tri akcelerometra (A1, A2 i A3), koji služe za detekciju nagiba bušotine.

Merenje akcelerometrima varira u skladu sa nagibom kanala bušotine. Kada je zenitni ugao mali, merenje se može izvršiti korišćenjem jednog akcelerometra (gravitacioni inklinometar). Međutim, kada je vrednost ugla veća (blizu 90°) merenje se vrši sa dva akcelerometra.



Slika 5.19 - Sklop senzora u uređaju za upravljanje (Gooneratne 2017)

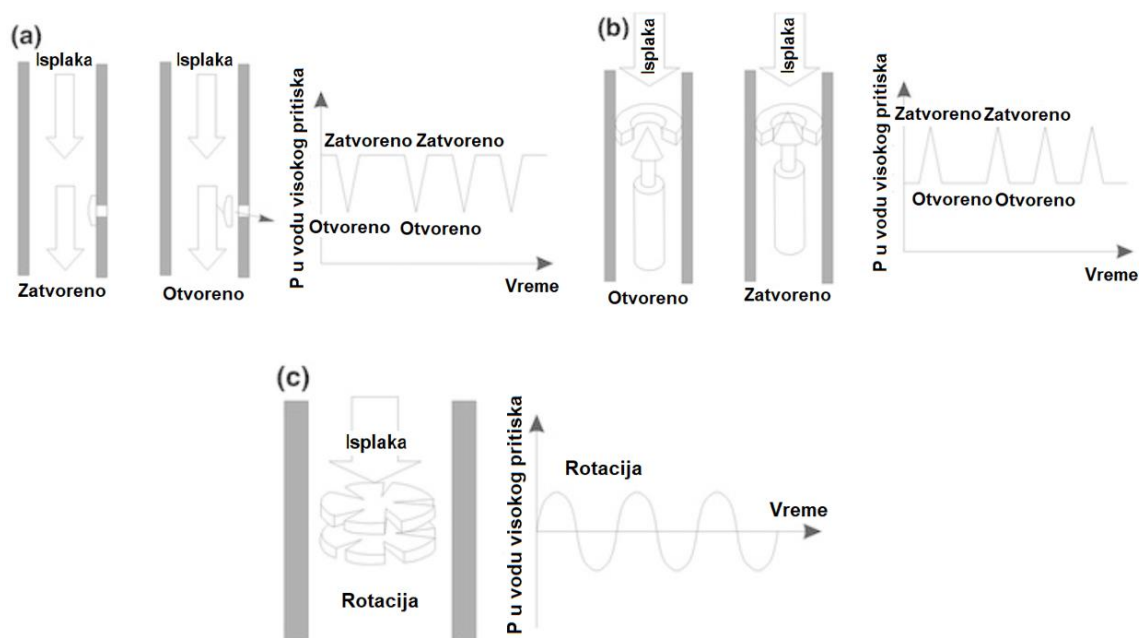
Ugao lica bušačkog pribora (dleta) se izračunava na osnovu odnosa između smera kanala bušotine kao i ugla zida bušotine.

Izmerene vrednosti se nakon toga kodiraju korišćenjem uronjenog elektronskog paketa u:

- binarni kod koji se prenosi putem impulsa u isplaci,
- modulisani signal sa pomeranjem faze koji omogućava reprezentaciju logičkih vrednosti "0" i "1".

Pribor za generisanje impulsa (otkucaja) se prema načinu generisanja impulsa klasifikuje na:

- sklop sa negativnim pritiscima,
- sklop sa pozitivnim pritiscima,
- sklop sa neprekidnim talasima.



Slika 5.20 - Vrste uređaja za stvaranje impulsa (Ma, 2016.)

Negativni otkucaji se postižu regulisanjem otvaranja i zatvaranja ventila pomoću pokretača ventila (vidi sliku 5.20a), što rezultira manjom količinom isplake koja ulazi u prstenasti prostor. Ovaj postupak dovodi do smanjenja pritiska na senzor zbog oticanja dela isplake u prstenasti prostor, istovremeno smanjujući otpor u bušačkim šipkama za 7 do 21 bar. Ovo smanjenje pritiska u isplaci proizvodi negativne otkucaje pritiska.

Trajanje impulsa zavisi od brzine otvaranja i zatvaranja ventila. Budući da ovaj proces izaziva trošenje ventila i energije, primenjuju se složene šeme kojima se kodiraju senzorski podaci i realizuje njihovo prenošenje u kratkom vremenskom intervalu (3 do 5 minuta).

Pozitivni impulsi (slika 5.20b) se generišu ograničavanjem protoka isplake putem pokretača ventila što rezultira povećanim otporom proticanju. Ovaj otpor je obično veći od smanjenja pritiska na senzoru, što je suprotno negativnim impulsima. U ovom scenariju impulsi su lakše merljivi, a vreme slanja i dekodiranja impulsa je isto kao kod negativnih impulsa i iznosi 3 do 5 minuta.

Neprekidni talasi se formiraju putem hidrauličke turbine koja se pokreće isplakom a koja dalje pokreće generator (slika 5.20c). Elektromotor generiše brzinu od 200-300 obrtaja u sekundi koja pokreće rotor turbine. Ovaj rotor zajedno sa statorom generiše neprekidni talas koji se moduliše ubrzavanjem ili usporavanjem rotora turbine. Fazni pomaci na površini se interpretiraju kao logički "0" i "1".

Energetski izvor za napajanje svih sklopova na telemetrijskom mernom uređaju može se osigurati na sledeće načine:

- korišćenjem litijumskih baterija,
- generisanjem energije pomoću turbine pokretane isplakom.

Svaki od ovih sistema ima svoje prednosti i nedostatke. Prednost upotrebe turbine leži u tome što može obezbediti veću količinu potrebne električne energije za pravilan rad telemetrijskog mernog uređaja. Takođe, ovaj sistem je povoljniji za rad pri visokim temperaturama.

Važno je napomenuti da je turbinski sistem za proizvodnju energije osetljiv na protok i vrstu isplake koja prolazi kroz turbinu, posebno ako u isplaci ima krupnih čestica stena koje mogu oštetiti turbinu.

Baterije imaju određene prednosti u odnosu na turbinu jer omogućavaju pun protok isplake do dleta bez značajnijeg pada pritiska. Pakovanje baterija može pružiti dovoljno energije kojom se pokreće uređaj u telemetrijskom mernom sistemu i to najviše do 300 časova. Uzimajući u obzir činjenicu da se

većina dleta potroši za oko 100 ili više časova, pokazalo se korisnim da se pakovanje baterija zameni u isto vreme kada i dleto.

Površinska oprema uključuje uređaje za prijem impulsa pritiska. Ovi uređaji su povezani s računarom koji obrađuje primljene signale i pretvara ih u vrednosti zenitnog ugla, azimuta kanala bušotine i položaja lica bušaćeg pribora (dleta). Podaci se nakon toga prenose do terminala koji ih šalje do indikatora (panela) kod bušača.

Prenos signala na relaciji predajnik na dnu bušotine - prijemnik na površini, ostvaruje se preko isplake na dva načina: putem impulsa i putem kontinuiranih talasa. U novije vreme, mada još uvek u eksperimentalnoj fazi ispitivanja, primenjuje se metod prenošenja signala sa dna bušotine na površinu pomoću elektromagnetnih talasa kroz stene.

5.6 Ispiranje horizontalnih bušotina

U poređenju sa čišćenjem vertikalnih bušotina kod izrade horizontalnih bušotina vladaju znatno složeniji uslovi koji se ogledaju u težnji taloženja čestica dezintegrisanih stena na donjem boku kosog, a naročito horizontalnog kanala bušotine. Ovo često stvara mogućnosti zaglave bušaćeg pribora, gubljenja isplake, nestabilnosti zida kanala bušotine, otežana merenja u kanalu bušotine i dr.

Ublažavanje ili eliminisanje neželjenih posledica u procesu čišćenja kanala horizontalnih bušotina moguće je jedino primenom kvalitetne isplake čija fizičko-hemijska svojstva odgovaraju datim uslovima.

U horizontalnim bušotinama, posebno u zoni radijusa krivine i delu kanala koji je horizontalan, postoje složeniji uslovi ispiranja u poređenju s vertikalnim bušotinama. Ovo je posledica većih obrtnih momenata, struganja bušaćih alata i tendencije tih alata da se zadrže na donjim zidovima kanala bušotine. Dodatno, ekscentričan položaj bušaćih alatki u odnosu na presek kanala bušotine doprinosi

nakupljanju i taloženju nabušenog materijala na donjem zidu horizontalnog kanala, što dodatno otežava proces ispiranja bušotine.

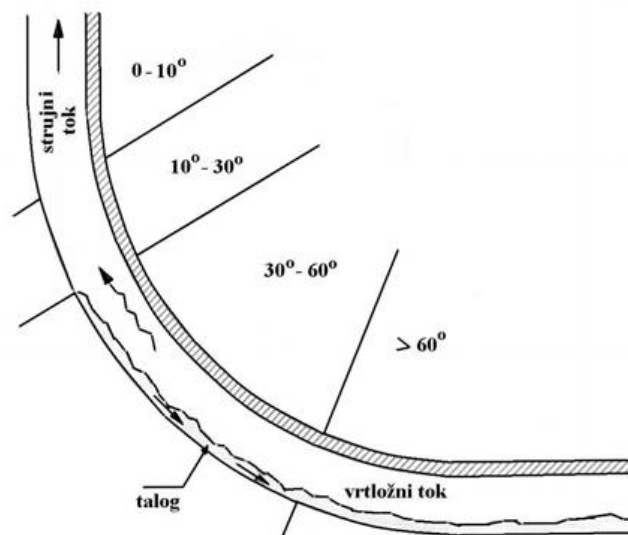
Pri ispiranju kanala bušotine prilikom izrade horizontalnih bušotina, neophodno je zadovoljiti četiri osnovna uslova:

- efikasno uklanjanje dezintegriranih čestica stena na površinu (čišćenje kanala bušotine),
- stabilizacija zida kanala bušotine,
- očuvanje kolektorskih svojstava produktivnih slojeva,
- adekvatno podmazivanje i hlađenje bušaćeg alata.

Efikasno uklanjanje čestica doprinosi čistom dnu, što može rezultirati izuzetnim napretcima bušenja i performansama rada dleta. Stoga je neophodno odstranjivati čestice dezintegriranih stena gotovo trenutno i kontinuirano sa dna bušotine i iznositi ih na površinu.

Efikasnost čišćenja kanala horizontalnih bušotina značajno zavisi od ugla otklona kanala bušotine. Postoje četiri zone:

- zona kanala bušotine koji je gotovo vertikalni (ugao do 10°),
- zona kanala bušotine koji je blago zakrivljen (ugao od 10° do 30°),
- zona kanala bušotine koji je srednje zakrivljen (ugao od 30° do 60°),
- zona kanala bušotine koji je jako zakrivljen (ugao od 60° do 90°).



Slika 5.21 - Prikaz intenzivnosti taloženja čvrstih čestica u zakrivljenom kanalu bušotine

Sa slike 5.21 se vidi da je kod ugla otklona kanala bušotine u zoni do 10° , taloženje čestica stena na bok kanala bušotine skoro zanemarljivo. Međutim, sa povećanjem ugla otklona kanala bušotine na donjem, ležećem delu kanala bušotine intenzitet taloženja postaje izraženiji. Praktična iskustva ukazuju da je najveći intenzitet taloženja čestica dezintegriranih stena u granicama treće zone, odnosno kod uglova otklona kanala bušotine od 30° do 60° . Međutim, taj nataloženi materijal se kasnije poput lavine sliva u dublje delove kanala bušotine.

Taloženje čestica dezintegriranih stena i neželjene posledice koje proizilaze mogu se ublažiti na sledeći način:

- primenom turbulentnog režima cirkulacije isplake kroz intervale horizontalnog i krivolinijskog kanala bušotine, što zavisi od geometrije kanala bušotine, kapaciteta isplačnih pumpi, pritiska u procesu ispiranja
- postavljanjem kolone bušaćeg pribora bliže gornjem - krovinskom zidu horizontalnog kanala bušotine, čime se poboljšavaju uslovi za iznošenje čestica dezintegriranih stena na površinu

- primenom kvalitetne isplake čija fizičko-hemijska svojstva odgovaraju datim uslovima (sastav isplake i koncentracija odabranih reagenasa).

U horizontalnom kanalu bušotine kretanje ili kotrljanje nabušenog materijala pod uticajem cirkulacije fluida zavisi od sledećih faktora: stepena turbulencije (određenog veličinom Reynoldsovog broja), reoloških svojstava fluida i fizičkih karakteristika čvrstih čestica.

Mehaničko usitnjavanje čestica stena prisutnih u isplaci postiže se rotacijom i manevrisanjem kompozicije bušačkog alata. Ovaj proces ne samo da usitnjava čestice već i doprinosi razbijanju nakupljenih čestica stena poboljšavajući tako uslove za njihovo kretanje. Povećanje viskoziteta isplake unapređuje uslove za kotrljanje nabušenog materijala, ali je istovremeno neophodno održavati povišeni pritisak isplake na nivou koji omogućava turbulentan tok isplake.

Da bi zidovi kanala bušotine, kao i sam kanal bušotine bili stabilni, mora biti ispunjen uslov koji se ogleda u stabilnosti fizičko-mehaničkih karakteristika stena, kao i uticaja isplake svojim fizičko-hemijskim svojstvima na zidove kanala.

Narušavanje stabilnosti zida bušotine manifestuje se kroz osipanje i obrušavanje stenske sredine kroz koju se buši. Ovo često rezultira zaglavljivanjem kolone bušačkog pribora i povećava opterećenje prilikom izvlačenja bušačkog pribora iz bušotine, što može dovesti do njenog kidanja (preloma). Nestabilnost kanala bušotine je složen problem koji zavisi od kvaliteta i karakteristika isplake, kao i od svojstava okolnih stena i njihove reakcije u interakciji sa isplakom.

Koliko je stabilan zid kanala bušotine, kao i to koliko je stabilan protok isplake, uglavnom je uslovljeno balansom između hidrostatičkog i hidrodinamičkog pritiska zajedno sa slojnim pritiskom.

Sa povećanjem dubine bušotina vertikalnog tipa pritisak isplake na dno bušotine se povećava. Isti slučaj je i kod koso-usmerenih kanala bušotine s tim što se u razmatranje mora uzeti ne merena dubina, nego stvarna vertikalna dubina

bušotine. Pošto se postigne ugao od 90° , povećanje vertikalne dubine nema, pa se pritisak koji deluje na dno i zidove samog horizontalnog dela kanala bušotine ne menja bez obzira na dužinu horizontalnog dela.

Prilikom izrade delova kanala bušotine, kako horizontalnih tako i kosih, ključno je istaći da se povećanjem nagiba smanjuje opseg gustine isplake unutar kojeg kanal ostaje stabilan, odnosno opseg između lomova stenske mase i obrušavanja zidova kanala bušotine.

Kontrola hidrostatskog pritiska postiže se putem gustine isplake. Važno je takođe uzeti u obzir hidrodinamičke pritiske za prevazilaženje trenja tokom protoka, pri čemu su relevantni reologija isplake, geometrija, kao i dimenzije kroz koje se vrši ispiranje, hrapavost zidova bušotine i sposobnost ispiranja. Pored dinamičkih pritisaka tokom cirkulacije isplakom, dodatni pritisci nastaju tokom manevra alatom. Oni mogu biti negativni prilikom izvlačenja alata, što može izazvati neželjeni dotok slojnog fluida ili eroziju zidova bušotine, dok su prilikom spuštanja pozitivni i mogu uzrokovati pucanje, tj. frakturiranje formacije i gubitak isplake u njoj.

Minimalno oštećenje zone produktivnih slojeva je od suštinskog značaja. Uticaj na oštećenje formacija kroz koje se buši imaju količina filtrata isplake kao i njegove fizičke i hemijske karakteristike. Najbitnije hemijske osobine su prisustvo aktivnih, nevezanih jona, dok je od fizičkih osobina važna pH vrednost. Na oštećenje slojeva koji su otvoreni vertikalnim ili koso-usmerenim bušotinama značajan uticaj ima vreme delovanja isplake u pribušotinskoj zoni. Zagađenje pribušotinske zone može nastupiti delovanjem filtrata cementne kaše tokom cementiranja bušotine, kao i od filtrata fluida koji se koriste za remontno-specijalne radove (prilikom istraživanja, opremanja bušotine itd).

Gotovo je neizvodljivo u potpunosti izbeći smanjenje propustljivosti poroznih i propustljivih stena tokom procesa izrade bušotina. Glavni cilj je minimizirati to smanjenje propustljivosti koliko god je moguće. Nakon završetka

bušotine izvode se operacije fizičke i/ili hemijske obrade u pribušotinskoj zoni u produktivnim formacijama (hidrauličko frakturiranje formacija, primena hemijskih reagensa, učestalo napucavanje, razaranje eksplozivnim punjenjima, izazivanje velikih depresija i slično) kako bi se uspostavila ili povećala propustljivost pribušotinske zone i poboljšali uslovi proticanja fluida kroz kanal bušotine ili injektiranja fluida u te formacije radi unapređenja eksploatacije ležišta fluida.

Tokom procesa bušenja važno je obezbediti hlađenje i podmazivanje bušaćeg alata. Prilikom rotacije dleta i bušaćeg alata, generiše se značajna količina neželjene toplote. Slojevi zbog svojih karakteristika ne mogu da apsorbuju svu tu energiju i količinu toplote, pa je neophodno da se veći deo odvede isplakom na površinu.

Hlađenje dleta i kompozicije bušaćeg alata doprinosi produženju njihovog radnog veka. Što je veća brzina cirkulacije isplake, viskoznost isplake i provodljivost toplote, hlađenje delova bušaćeg pribora je bolje. Međutim, regulisanje ovih pokazatelja u cilju poboljšanja uslova hlađenja bušaćeg alata ograničeno je zbog neophodnosti sprovođenja ponekad važnijih funkcija ispiranja bušotina.

Isplaka treba da poseduje i sposobnost podmazivanja površina bušaćih sipki, ležišta konusnih dleta, hidrauličkog pribora i dr. Primenom kvalitetne isplake postiže se smanjenje utroška energije na bušenju i smanjenju havarija u procesu bušenja. Međutim povećani sadržaj materijala za podmazivanje u isplaci može dovesti do smanjenja mehaničke brzine bušenja. Zbog uticaja sredstava za podmazivanje, na utiskivanje zubaca dleta u dno bušotine usled proklizavanja. Zbog toga, sadržaj sredstava za podmazivanje u isplaci treba da bude optimalan (Hrković & Bizjak, 2002).

5.7 Konstrukcija horizontalnih bušotina

U većini slučajeva, kako bi se izbegle neželjene posledice, duboke bušotine zahtevaju postavljanje zaštitnih cevi koje se spuštaju unutar bušotine, a zatim cementiraju određeni delovi ili cela prstenasta zona između spoljnog prečnika zaštitnih cevi i zida bušotine. Na osnovu geoloških uslova i dubine bušotine broj i prečnik zaštitnih cevi kao i prečnici bušačkih alata koji se koriste variraju na određenim intervalima unutar bušotine.

Broj zaštitnih kolona spuštenih u bušotinu, dubina ugradnje svake od njih, njihove dimenzije (spoljašnji prečnik, dužina), vrsta i kvalitet čelika od koga su izrađene, prečnik dleta i bušačkih šipki kojima se izvodi bušenje za svaku kolonu, visina podizanja cementnog rastvora u prstenasti prostor, definišu pojam konstrukcije bušotine. Konstrukcija bušotine zavisi od niza faktora kao što su: cilj i metod bušenja, geološki uslovi i dubina bušenja, broj produktivnih horizonata, metod otvaranja ovih horizonata, njihova produktivnost i kolektorska svojstva, slojni (porni) pritisci i pritisci frakturiranja stena, temperatura i dr.

5.7.1 Prečnici dleta

Prečnici dleta koja se upotrebljavaju prilikom izrade horizontalnog dela kanala bušotina velikog radijusa krivljenja jednaki su radijusima dleta koja se primenjuju za bušenje vertikalnih i koso-usmerenih bušotina sličnih dužina i izbušenim u sličnim geološkim uslovima.

Za bušotine srednjih radijusa krivljenja, gde ugao krivljenja raste do $2,4^{\circ}/10$ m, maksimalni prečnici dleta iznose 0,311 m (12 $\frac{1}{4}$ inča), kod zakrivljenja većih od $2,4^{\circ}/10$ m, najveći prečnici dleta iznose 0,250 m (9 $\frac{7}{8}$ inča).

Kod bušotina koje imaju mali radijus krivljenja, dleta imaju maksimalni prečnik do 0,165 m (6 $\frac{1}{2}$ inča), a obično se buše prečnicima dleta od 0,114 m (4 $\frac{1}{2}$ inča).

Prilikom izrade bušotina sa vrlo malim radijusom krivine, kanal bušotine se formira alatom čiji je prečnik ne veći od 0,3 m (1 ft).

5.7.2 Ugradnja zaštitnih cevi u kanal bušotine

U ranim fazama primene tehnike horizontalnog bušenja u preko 80% situacija, često se koristilo otvoreno dno (open hole) kao najisplativiji i najrazumniji pristup opremanju ovih bušotina s obzirom na buduće proizvodne zahteve.

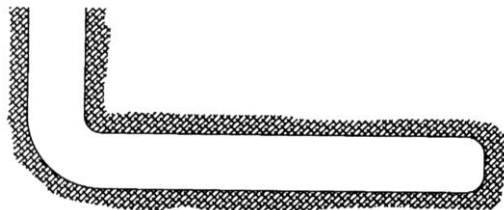
Ipak, usled nestabilnosti kanala bušotine, visokih slojnih pritisaka i drugih nepovoljnih faktora koji utiču na stabilnost, neophodno je obložiti različite delove kanala bušotine zaštitnim cevima različitih prečnika, u zavisnosti od stepena stabilnosti.

Pre bušenja horizontalnog kanala bušotine, ugrađuje se tehnička kolona zaštitnih cevi do kraja zakrivljenja (u vertikalnom delu kanala bušotine cementira se. Zatim se primenjuje jedan od sedam načina opremanja bušotine:

- ostavlja se open hole (otvoreno dno),
- vrši se klasična cementacija niza zaštitnih cevi,
- ugrađuje se slotirani lajner bez pakera,
- ugrađuje se slotirani lajner sa jednim ili dva pakera,
- ugrađuje se lajner prethodno opremljen zasipom šljunka,
- ugrađuju se zaštitne cevi ili lajner sa spoljašnjim pakerom i zatvorenim slotovima, koji se aktiviraju tubingom,
- vrši se delimična cementacija lajnera.

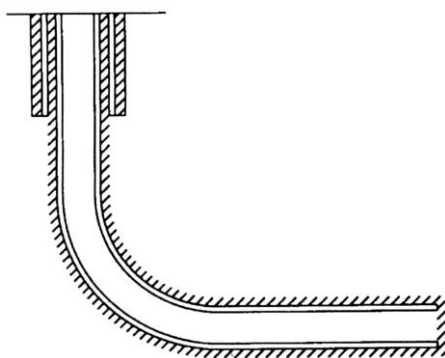
Najekonomičniji i najracionalniji način opremanja bušotine, s obzirom na buduću proizvodnju fluida, jeste otvoreno dno (Open hole), kako je ilustrovano na slici 5.22. Ipak, primenljivost ovog pristupa zavisi od povoljnih geomehaničkih karakteristika produktivnih formacija, kao i od uslova u kojima krovina ili podina

svojim hidrauličkim ili geomehaničkim osobinama neće negativno uticati na eksploataciju fluida iz produktivnih formacija.



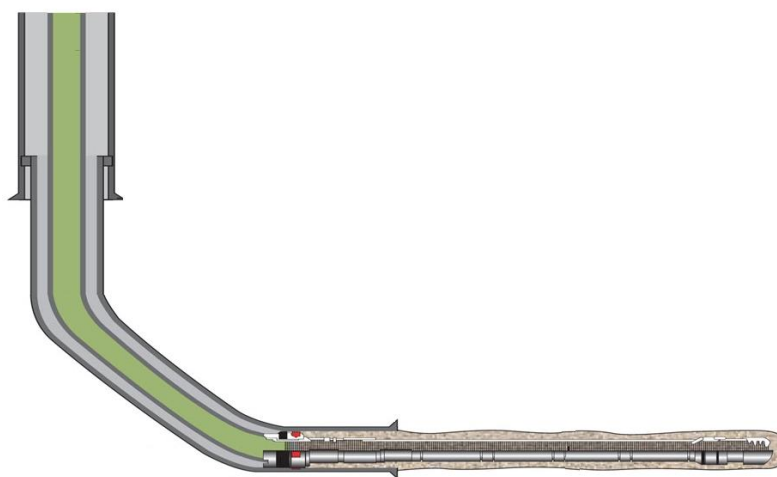
Slika 5.22 - Šema konstrukcije bušotine sa otvorenim iskrivljenim i horizontalnim kanalom (Open Hole)

Za klasično cementiranje niza zaštitnih cevi, mesta koja se smatraju stabilnim za zakrivljeni i horizontalni kanal bušotine gde se ne očekuje ugrožavanje propusnosti formacija pribušotinske zone produktivnog sloja cementom, ugrađuje se eksploataciona kolona. Ova kolona zaštitnih cevi se ugrađuje od usta bušotine (slika 5.23) ili od pete tehničke kolone (lajner kolona). Najčešće se tehnička kolona ugrađuje i osigurava do mesta početka horizontalne putanje, a horizontalni kanal bušotine se zatim prekriva lajnerom ili eksploatacionom kolonom od usta bušotine do konačne dubine.



Slika 5.23 - Šema klasične zaštite kanala bušotine cementacijom zaštitnih cevi

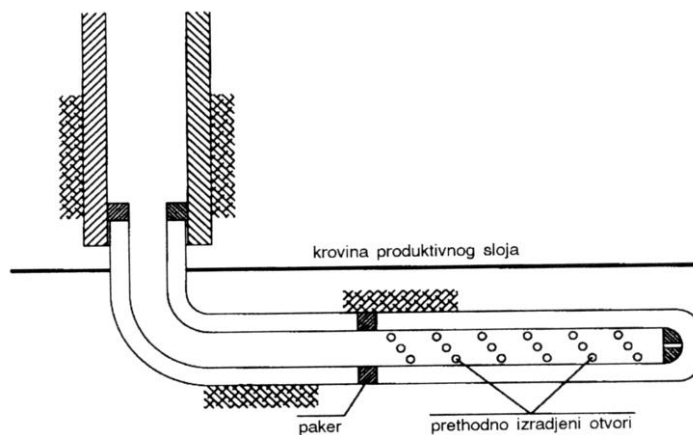
Kada su stene kroz koje prolazi horizontalni kanal bušotine stabilne, ali postoji sumnja da može doći do značajnog smanjenja propusnosti pribušotinske zone usled prisustva cementnog rastvora ili njegovog filtrata, eksploataciona kolona zaštitnih cevi se ugrađuje u bušotinu od površine ili lajner kolona od pete tehničke kolone (slika 5.24). Kako bi se izbegli poremećaji ravnoteže u kanalu bušotine usled napucavanja, fabrički se na lajneru izrađuju otvori u obliku kruga ili otvori uzdužnog oblika.



*Slika 5.24 - Šema klasičnog zakrivljenog kanala bušotine opremljenog kolonom zaštitnih cevi i horizontalnog kanala bušotine opremljenog lajnerom
(<https://petoil.blogspot.com/2012/03/horizontal-well-completion.html>)*

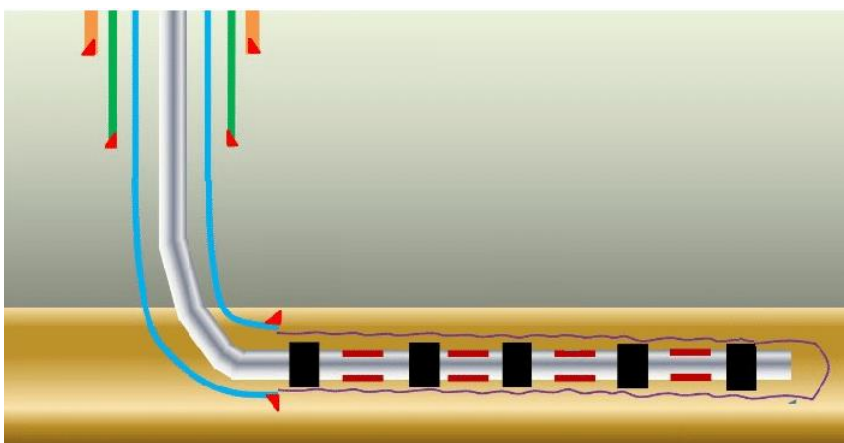
Iako je uobičajeno da je izrada horizontalnog kanala bušotine predviđena projektom, tokom procesa izrade nakon dostizanja otklona od 90°, stvarni kanal često pokazuje krivudavu putanju po dubini, što može rezultirati skretanjem ka dole ili ka gore. Ova odstupanja se često koriguju vraćanjem na željenu dubinu tokom procesa bušenja kanala bušotine. Zbog toga je često neophodno odvojiti deo kanala bušotine koji prolazi kroz produktivni sloj od stena krovine ili podine zasićenih vodom. Umesto klasičnog izolovanja putem cementacije, u horizontalnim bušotinama se izolacija slojeva postiže korišćenjem pakera (slika 5.25). Obično se

koriste paketi sa mogućnošću naduvavanja, koji se aktiviraju pneumatski ili hidraulički.



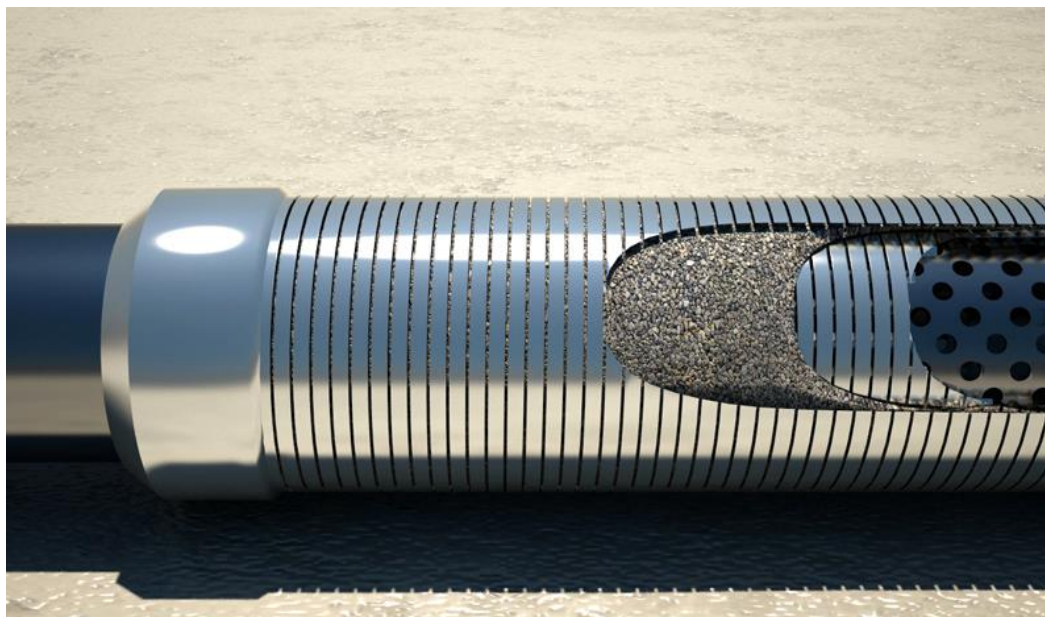
Slika 5.25 - Konstrukcija horizontalnog kanala bušotine sa ugrađenim lajnerom, prethodno delimično izbušen otvorima i opremljen s jednim pakerom

Kada se kanal bušotine nalazi u produktivnom sloju, potrebno ga je izolovati od neproduktivnih zona. Uobičajeno je da se postavi jedan paker neposredno iza bočnih otvora lajnera na mestima gde se završava neproduktivni deo sloja koji pokriva deo lajnera bez bočnih otvora. U situacijama kada kanal bušotine pređe iz produktivnog sloja u neproduktivni, pa opet u produktivni, izolacija se postiže s dva pakera smeštena na oba kraja neproduktivnog sloja (slika 5.26). Deo lajnera koji prolazi kroz neproduktivni sloj obično nije opremljen bočnim otvorima.



Slika 5.26 - Konstrukcija horizontalnog kanala bušotine sa ugrađenim lajnerom, prethodno izbušen otvorima i opremljen s više pakera (Liang, 2020)

U situacijama gde se očekuje da će iz produktivnog sloja zajedno s fluidom u kanal bušotine ulaziti značajna količina peska koja bi mogla otežati ili čak sprečiti produženu eksploataciju, kao i potencijalno narušiti stabilnost horizontalnog kanala bušotine, lajner se spušta s bočnim otvorima male širine i veće dužine. Pre postavljanja lajnera unutrašnjost se ispunjava šljunkom odgovarajuće granulacije (vidljivo na slici 5.27).



Slika 5.27 – Lajner sa nasipom šljunka sa bočnim otvorima

(<https://www.gxscreen.com/technology-news/pre-packed-screens-vs-gravel-pack-screen/>)

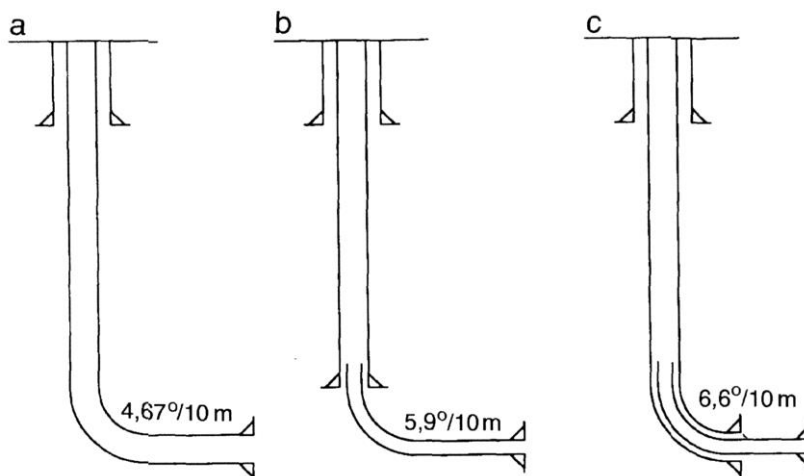
Kada postoji rizik od začepljenja bočnih otvora peskom ili drugim česticama stena tokom ugradnje kolone zaštitnih cevi ili lajnera, mogu se primeniti konstrukcije gde su bočni otvori na zaštitnim cevima ili lajneru prekriveni poklopcima. Nakon pozicioniranja i ugradnje zaštitnih cevi ili lajnera u željeni položaj u bušotini, aktiviranjem pakera odvaja se produktivni sloj od neproduktivnog, dok se dejstvom pritiska na posebni deo pribora na dnu uzlaznih cevi (tubinga) postepeno otvaraju svi prethodno zaklopljeni bočni otvori.

Lajneri koji su delimično cementirani, odvojeni su pakerom u prstenastom prostoru od delova lajnera koji imaju perforacije. Kada tehnička kolona ne pokriva potpuno zakrivljeni deo bušotine ili kada početni deo horizontalnog kanala bušotine ne prolazi kroz produktivni sloj, može se ugraditi lajner koji ima samo delimične bočne otvore u prednjem delu. Paker se postavlja ispred zadnjeg kraja otvora kako bi se odvojio produktivni sloj od neproduktivnog. Zatim se kroz otvor ispred pakera koji je strukturno sličan otvoru za dvostepenu cementaciju (DV uređaj) vrši cementacija prstenastog prostora oko neperforiranog dela lajnera (dela bez bočnih otvora).

Za svaku pojedinačnu lokaciju odabir konstrukcije bušotine zavisi od različitih faktora kao što su: dubina ciljne formacije, geološki sastav te formacije, prisustvo formacija iznad produktivnih koje se protežu do površine, prethodna iskustva na tom ili sličnim poljima, zahtevi za bezbednošću na radu, zaštita okoline i drugih faktora.

U praksi najčešće se koriste tri metode za stabilizaciju kanala bušotina koje su prikazane na slici 5.28:

- pomoću eksploatacione kolone od usta bušotine do kraja horizontalnog kanala bušotine (bez tehničke kolone) (slika 5.28a),
- pomoću tehničke kolone do tačke skretanja i pomoću lajnera od pete međukolone do kraja horizontalnog kanala bušotine (slika 5.28b),
- pomoću tehničke kolone kroz zakrivljeni deo bušotine do tačke dostizanja ugla otklona od 90° , nakon čega se koristi lajner do kraja kanala bušotine (slika 5.28c).



Slika 5.28 - Primeri konstrukcija horizontalnih bušotina

5.8 Cementacija horizontalnih bušotina

Cementacija horizontalnih bušotina obuhvata proces popunjavanja prostora oko kolone zaštitnih cevi cementnom kašom koji se nakon stvrdnjavanja formira u čvrstu cementnu masu. Ova procedura se prilagođava uslovima u bušotini i svrsi same kolone zaštitnih cevi i bušotine, te se može sprovesti na celoj dužini kolone zaštitnih cevi ili samo u određenim intervalima.

Osnovna uloga cementacije bušotina je:

- da se spreči gubljenje isplake ili dotok fluida u bušotinu iz slojeva kroz koje se buši,
- izolacija pojedinih nabušenih slojeva i sprečavanje cirkulacije slojnih fluida ili isplake prstenastim prostorom iza kolone zaštitnih cevi,
- sprečavanje delovanja korozije slojnih fluida na ugrađene zaštitne cevi,
- odvojeno iskorišćenje ležišta ugljovodonika kao zasebnih hidrauličkih celina,
- skretanje bušotine sa cementnog mosta i dr.

U odnosu na cementaciju vertikalnih bušotina postupci cementacije horizontalnih bušotina nešto su složeniji. Pre početka cementacije jako iskrivljenih i horizontalnih kanala bušotina mora se uspostaviti koncentričnost kolone zaštitnih cevi u odnosu na osu bušotine. Ovo se može ostvariti uz primenu specijalnih krutih centralizera sa jakom konstrukcijom koji se na kolonu zaštitnih cevi postavljaju na međusobnim maksimalnim rastojanjima od 6,1 m (20 ft). Na ovaj način centralizeri mogu da izdrže veća opterećenja koja nastaju usled težine kolone zaštitnih cevi.

Kada se uspostavi zadovoljavajući stepen koncentričnosti pristupa se procesu cementacije prostora predviđenog za cementaciju.

Pri mirovanju cementnog rastvora usled jako razvijene međufazne površine cementni rastvor predstavlja nestabilan sistem što dovodi do njegovog razdvajanja na dve sredine, vodu i čvrstu fazu. Pri tome čvrste čestice se u obliku klina talože na ležeći zid horizontalnog kanala bušotine, a slobodna voda se podiže uz gornji (krovinski) zid kanala bušotine.

Mere sprečavanja ove pojave sastoje se u uspostavljanju sedimentacione stabilnosti cementnog rastvora koji se može postići obradom cementnog rastvora fizičko-hemijskim reagensima.

U slučaju nestabilnosti cementni rastvor se raslojava, tečnost se probija u slabije delove strukture tvrde faze obrazujući brazde usled čega se narušava neprekidnost čvrste faze pa se stvara mogućnost pretakanja fluida između slojeva stena prekrivenih stvrdnutim cementom (cementnim kamenom).

Jedan od načina postizanja hermetičnosti prstenastog prostora bušotine predstavlja visok stepen istiskivanja isplake cementnim rastvorom iz prostora predviđenog za cementaciju, odnosno uspostavljanje čvrstog kontakta cementnog rastvora između zida bušotine i spoljašnjeg prečnika zaštitne kolone. Ovo u najvećoj meri zavisi od režima proticanja cementnog rastvora u tom prostoru uz odgovarajući stepen koncentričnosti zaštitne kolone i kanala bušotine.

Za uspešnu cementaciju horizontalnih i jako iskrivljenih kanala bušotine treba da se uspostavi turbulentni režim proticanja cementnog rastvora. Uspostavljanjem turbulentnog režima cementnog rastvora postiže se ravnomerno popunjavanje prostora predviđenog za cementaciju. Turbulentnim režimom povećava se brzina uzlaznog toka cementnog rastvora. Međutim, povećanje brzine kretanja cementnog rastvora koji se postiže pumpama visokog kapaciteta ograničeno je, jer se pri povećanju brzine kretanja cementnog rastvora povećava pritisak u bušotini pa u određenim uslovima može doći do frakturiranja stena.

6 ZAKLJUČAK

Istraživanje teorijskih aspekata tehnike i tehnologije izrade dirigovanih bušotina pokazalo je složenost i važnost ovog procesa u naftnoj industriji. Analizom različitih metoda i tehnika izrade dirigovanih bušotina sagledan je širok spektar faktora koji utiču na uspešnost ovih operacija. Geološke karakteristike, tehničke specifikacije opreme, kao i sigurnosni aspekti, sve su to ključni elementi u planiranju i izvođenju ovih bušotina. Analizirajući između ostalog cementacije i stabilnost kanala bušotina zaključeno je da su preciznost i stručnost neophodni za osiguranje dugoročne funkcionalnosti i bezbednosti kao i poboljšanja produktivnosti kako same proizvodnje nafte i gasa, tako i samih tehnika i tehnologija. Kroz integraciju teorijskih principa i praktičnih iskustava možemo ostvariti napredak i efikasnost u izgradnji dirigovanih bušotina čime se podupire razvoj naftne industrije ka održivijoj budućnosti.

Koso-usmereno (dirigovano) bušenje je u poslednje vreme intenzivno zastupljeno u našoj praksi. Ovo je veoma bitno, tim pre što se ekonomska efektivnost bušenja koso-usmerenih bušotina ocenjuje po metru dužnom bušotine i mehaničkom brzinom bušenja. Kada bi se kao kriterijum takve efektivnosti uzeli ukupni troškovi istraživanja jednog ležišta onda usmereno bušenje nesumnjivo ima niz prednosti. Da bi ta prednost usmerenog bušenja (posebno primenom složenih trajektorija) bila još izrazitija, neophodno je da se posebna pažnja pokloni optimalnom projektovanju takvih bušotina i optimizaciji ukupnih troškova istraživanja ležišta kao celine.

Primena horizontalnih bušotina kao nove tehnologije u razradi ležišta ugljovodonika tehnološki je daleko složenija i skuplja za izradu od vertikalnih bušotina. Međutim, pored toga što izrada horizontalnih bušotina zahteva primenu vrhunske tehnologije bušenja i opreme kao i projektovanje tih bušotina, njihovo bušenje je ekonomski opravdano jer omogućava znatno povećanje produktivnosti.

Kod donošenja odluke za realizaciju izrade horizontalnih bušotina neophodno je detaljno razmotriti sve ograničavajuće faktore koji utiču na primenu ovog načina bušenja koji se uglavnom odnose na nedostatak potrebne opreme i tehnologije za dostizanje ugla nagiba od 90° i bušenja horizontalnog dela kanala bušotine.

Među tehnologije koje su preko potrebne za uspešno bušenje horizontalnih ili koso-usmerenih bušotina spada i telemetrija. Ovom tehnologijom, sa zakašnjenjem od najviše pet minuta, prikupljaju se brojni pokazatelji o prostornom položaju trajektorije bušotine i fizičkim svojstvima stena kroz koje se buši.

Navedenim merenjima dobijaju se pokazatelji koji omogućavaju da se znatno brže i bolje nego kod klasične izrade vertikalnih bušotina reaguje na moguća odstupanja od projektom zadatog pravca i svrsishodnog usmeravanja trajektorije bušotine u cilju uspešnog postizanja projektom zadatog cilja.

Trend primene horizontalnih bušotina u svetu je u stalnom porastu pa se oseća potreba za primenom ove tehnologije bušenja i u našoj naftnoj privredi, jer stvara mogućnosti za povećanje proizvodnje i boljeg iskorišćenja ležišta.

LITERATURA

1. Bizjak R., 2004. Tehnologija bušenja sa projektovanjem, DIT NIS - Naftagas, Novi Sad.
2. Bosworth, S., Saad El Sayed, H., Ismail, G., Ohmer, H., Stracke, M., West, C., Retnantom, A., 1998. Key Issues in Multilateral Technology, Schlumberger
3. Desbrandes R., 1990. An overview of Measurement While Drilling – Logging While Drilling Technology, Louisiana State University, Baton Rouge, LA.
4. Elyasi S., 2014. Egyptian Journal of Petroleum 25(1), Tehran, Iran.
5. Economides M.J., Nolte K.G., 1989. Reservoir Stimulation, and edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
6. Gooneratne C., Li B., Moellendick T., 2017. Downhole Applications of Magnetic Sensors, Dhahran, Saudi Arabia.
7. Heriot Watt University, 2005. Drilling Engineering, Edinburgh.
8. Hrković K., Lazić M. Usmereno bušenje pri istraživanju ležišta čvrstih mineralnih sirovina i podzemnih voda, monografija Rudarsko – geološki fakultet Univerziteta u Beogradu
9. Hrković K., Bizjak R., 2002. Teorijski aspekti i primena istražno eksploatacionog bušenja: Tehnika i tehnologija, DIT NIS – Naftagas, Novi Sad.
10. Howes J., 1988. Horizontal and Age, The Oilman.
11. Kalinin B.A., Nikitin K.M., Soldkij B.Z., 1997. Burenje napravlenih i gorizontaalnih skvačin, Nedra, Moskva.
12. Liang Q., Xia B., Liu B., Nie Z., Gao B., 2020. Experimental Study on the Local Drag of Completion String with Packers in Horizontal Wells, Beijing, China.

- 13.
14. Ma T., Chen P., Zhao J., 2016. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, Switzerland
15. Mitchell R., 2006. Drilling Engineering, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX
16. Pet-Oil, 2011. Geometry of Multi-Lateral wells, URL: <https://pet-oil.blogspot.com/2011/06/multi-lateral-drilling.html>
17. Pet-Oil, 2012. Horizontal Well Completion, URL: <https://petoil.blogspot.com/2012/03/horizontal-well-completion.html>
18. PetroWiki, 2016b. Horizontal wells URL: http://petrowiki.org/Horizontal_wells (9.5.2016.)
19. Seibi A., Karrech A., Boukadi F., Pervez T., 2009. Wellbore Path Estimation Using Measurement While Drilling Techniques: A Comparative Study and Suggestions for Improvements, Louisiana, United States.
20. Steiner I., Bošković, Steiner Z., 1994. Tehnologija vodoravnog bušenja, Zagreb.