

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT – *Mine Petrol Gaze*

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

*Contribuții privind optimizarea exploatarei
sistemelor de hidrocarburi cantonate în
zăcăminte neconvenționale*

**Conducător științific,
Prof. Dr. Ing. Lazăr Avram**

**Doctorand,
Dan Rădăcină**

Ploiești 2020

REZUMAT

Exploatarea hidrocarburilor cantonate în zăcămintele neconvenționale, cu referire directă la rezervoarele din șisturi argiloase și cele având matricea densă, se poate face prin forajul de sonde orizontale, de regulă săpate în număr mare de pe aceeași locație (*pad*) de foraj.

Ca urmare a particularităților care derivă din geometria specifică acestor tipuri de sonde (orizontale, extinse, cu intensități mari de deviere ș.a.), tehnologia de foraj și completare, ca și factorul economic, trebuie să răspundă în sens pozitiv acestor provocări tehnologice specifice. O parte din aceste provocări sunt tratate pe larg în aceasta lucrare.

În capitolul 1 este prezentat stadiul actual al explorării și exploatării gazelor de șist. Având date disponibile din experiența nord americană, autorul consideră necesar și util de a include în studiu și compararea straturilor de șisturi argiloase din Europa, presupuse a fi productive, cu cele deja dovedite din America de Nord. Proprietățile medii pentru toate șisturile argiloase europene și pentru argilele tipice din carbonifer și jurasic sunt luate în considerare pentru analogia cu șisturile argiloase nord-americane.

În capitolul 2 este prezentat conceptul de calitate pentru gaura de sonda. În ciuda incertitudinilor geologice și geofizice, din punct de vedere tehnic, sonda trebuie să fie construită din prima încercare la un nivel de calitate care să permită amortizarea ei în intervalul de tip prognozat. Calitatea găurii de sondă nu are o definiție unică, fiind un concept care înglobează multiple discipline. În acest sens se prezintă aspecte specifice privitoare la calitatea sondelor, traiectele de sonde, măsurarea parametrilor geometrici, tortuozitatea sondelor și indicele de dificultate al forajului direcțional. Intensitatea de deviere și tortuozitate sondelor au un impact deosebit asupra garniturii de foraj și ulterior în timpul proceselor de extracție, datorită inducerii solicitărilor la oboseală pentru garnitura de foraj, tije de pompare etc.

Capitolul 3 abordează influența curburilor asupra garniturii de foraj, respectiv estimări curburii maxime admisibile. Indiferent de faptul că traiectul găurii de sondă este corectat sau nu prin modelarea tortuozității, datele din măsurătorile de deviație reale ridicate în timpul forajului, vor diferi față de cele proiectate, respectiv modelate. Deși ținta geologică este aceeași, condițiile geologo fizice ale formațiunilor forate impun, în majoritatea cazurilor, corecții (adeseori drastice) de traiect. Prin prelucrarea unui mare număr de date experimentale, autorul stabilește limitele intensității maxime de deviere pentru evitarea oboselii, la prăjinile de foraj G105, respectiv valorile intensităților maxime de deviere astfel ca forțele laterale din racorduri să fie situate între 500 și 1500 daN.

Capitolul 4 analizează forțele axiale, starea de flambaj și momentele de torsiune din garnitura de foraj. Lucrarea se referă pe larg, atât pentru faza de proiectare a sondelor cât și la aspectul operațional cu diferite particularități, care rezultă în timpul operațiunilor de foraj. Diagramele de forțe și momente sunt trasate pentru un studiu de caz, și sunt analizate așa încât utilizatorul să înțeleagă avantajele utilizării acestor calcule și diagrame în alegerea și exploatarea unei garnituri de foraj, ca și diminuarea unor riscuri legate de tubarea unor sonde orizontale. În afara aspectelor teoretice de proiectare, sunt specificate, detaliat, anumite particularități care trebuie să fie considerate la execuția efectivă, în șantier, a unor programe tehnologice de foraj.

Capitolul 5 prezintă aplicarea în practică a acestor ecuații, respectiv o modelare calitativă a uzurii pentru o coloană intermediară, uzură cauzată de rotația racordurilor speciale ale prăjinilor de foraj în interiorul coloanei subiect, cu implicațiile ce rezultă de aici. Totodată sunt prezentate și contribuțiile originale ale autorului cu privire la modelarea uzurii pentru coloanele intermediare tubate în găuri curbilinii, și sunt enumerate concluzii și sugestii utile asupra folosirii ecuațiilor de forțe și momente de torsiune atât în proiectare cât și în supervizarea în timp real a operațiunilor de foraj.

Pe această cale, autorul mulțumește acționarilor și managementului firmei Dosco Petroservices Romania SRL, pentru suportul acordat la realizarea acestei lucrări, mai ales pentru accesul la unele date de șantier.

ABSTRACT

The exploitation of hydrocarbons located in unconventional reservoirs, with direct reference to the shale deposits and those having a dense matrix, can be carried by drilling a large number of horizontal wells, usually from the same location – the drilling pad.

Due to the particularities deriving from the geometry of these types of wells (horizontal, ERD, with high DLS, etc.), the drilling and completion technology, as well as the economic factor, must respond positively to these specific technological challenges. Some of these challenges are dealt extensively in this work.

Chapter 1 is a highlight of the actual status of the shale gas exploration and exploitation. Having data available from the North American experience, the author considers that it is necessary and useful to include in the study the comparison of the European shale layers, supposed to be gas productive, with those already being proven in North America. The average properties for all European shale strata and for typical carboniferous and jurassic shales are taken into account for the analogy with North American shales.

Chapter 2 is related of the borehole quality concept. Despite of the geological and geophysical uncertainties, from a technical stand point, the well must be drilled and completed from the first attempt at a quality level that will allow to the related investment to create the planned Rate of Return within the forecasted time span. In this regard, are taken into consideration the specific aspects related to the quality of the wells as: the paths of the wells, the measurement of the geometric parameters, the tortuosity of the wells and the Directional Drilling Difficulty Index. The intensity of deflection and tortuosity of the wells has a tremendous impact on the tubulars proposed to be used in the hole. The fatigue stress will affect the drilling string and later, during the production processes, the pumping rods and so on.

Chapter 3 has emphasized the well's trajectory curvatures effects on the drilling string, so for the estimation of the maximum allowable well curvature. Regardless if borehole path is corrected or not by modeling the tortuosity, the inclination and azimuth data from the actual deviation measurements taken during the drilling ops., will be different from the projected vs. modeled ones. Although the geological target coordinates are the same and does not change while drilling, the physical geological conditions of the drilled formations, in most cases, require (often drastic) corrections of the path. By processing a large number of experimental data, the author sets the limits of maximum deviation intensity to avoid fatigue for the G105 drilling pipe, respectively the values of maximum dog leg severities such that the lateral forces in the connections should be between 500 and 1500 daN.

Chapter 4 deals with the analysis of the axial forces, the buckling state and the torque moments in the drilling string. The work refers extensively, both for the design phase of the wells and for the operational aspect, with different particularities, which result during drilling operations. The torque and drag diagrams are drawn for a case study, and are analyzed so that the user understands the benefits of using these calculations and diagrams in choosing and operating a drill string, as well as reducing the risks related to the drilling, and running casing in horizontal wells. Aside off the theoretical aspects of well design, there are considerations that must be strongly taken into account at the rig site, on the daily basis while the drilling operations are in progress.

Chapter 5, is a direct output for the practical application of these equations, a qualitative wear modeling for an interm. casing is presented and analyzed. Are depicted the consequences of the casing wear caused by the rotation of the drill pipe connections inside of the subject casing. In the same time, the author's original contributions regarding the modeling of the qualitative wear for the interm. casing set in curved holes are presented, with conclusions and suggestions are expressed for the utilisation of the torque and drag equations with emphasis both in the well design and in real-time supervision of the drilling operations.

The author wishes to thank to the shareholders and the management of the company Dosco Petroservices Romania SRL, for the support granted in order to accomplish this work, especially for the access to some technical field data.

1.

Stadiul actual al explorării și exploatării gazelor de șist

1.1. Hidrocarburi cantonate în zăcăminte neconvenționale

Conform definițiilor precizate de *US Energy Information Administration*, producția de țiței și gaze neconvenționale este un termen acoperitor pentru țițeiul și gazele care se produc prin procedee și tehnologii care nu ating cerințele (criteriile) celor folosite pentru extracția convențională.

Pe de altă parte, producția convențională de țiței și gaze - producție obținută din sonde pentru hidrocarburi, săpate în rezervoare geologice care, alături de proprietățile hidrocarburilor, permit curgerea acestora din strat în gaura de sondă [1]. În figura 1.1 sunt prezentate, comparativ, câteva caracteristici de bază aferente rezervoarelor convenționale, respectiv celor neconvenționale [9].

Rezervoare convenționale	Rezervoare neconvenționale
Contin gaz. Pot curge natural ușor	Permeabilitate scăzută curgere dificilă
Titeiul și gazele migrează din roca sursă	Titeiul și gazele nu migrează
Tipuri de roca Rezervor: 1-Gresii 2-Calcare fisurate 3-Dolomite fisurate	Roca sursă este roca rezervor : 1 Titei / gaz de sist 2 Titei / gaz de matrice densă 3 Gaz metan de carbune (CBM) 4 Nisipuri gudronate 5 Hidrați de Metan
Producție ușoară prin metode directe	Producția din neconvențional se face prin crearea unui sistem de fracturi care să stimuleze curgerea în sondă

Fig. 1.1. Caracteristici de bază aferente rezervoarelor convenționale, respectiv celor neconvenționale [9]

În figura 1.2 sunt prezentate, în sinteză, elementele specifice aferente acumulărilor de hidrocarburi convenționale vs. acumulări continue neconvenționale [1].

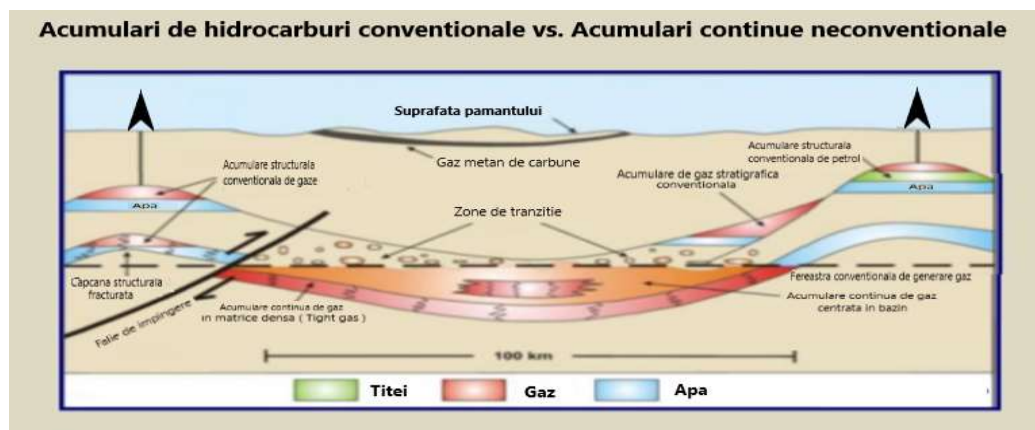


Fig. 1.2. Acumulări de hidrocarburi convenționale vs. acumulări continue neconvenționale

Rezervoarele neconvenționale [2] - recuperare dificilă. Productivitatea unui zăcământ de hidrocarburi depinde de: permeabilitate rezervor, presiune rezervorului, vâscozitatea și densitatea hidrocarburi. Ca urmare a acestor limitări, nu este posibil să se extragă toate hidrocarburile dintr-un rezervor, ci doar anumite procente.

Factorul de recuperare - face posibilă evaluarea procentului de hidrocarburi care pot fi extrase într-o manieră profitabilă din punct de vedere economic. [6]

Rezervele neconvenționale trebuie privite sub două aspecte [3]: fluide neconvenționale și rezervoare ca atare neconvenționale.

Fluidele neconvenționale [3] privesc, bitumenul și țițeiul greu - Procedee de extracție complicate - implică câteva dezavantaje majore: impactul ecologic, afectarea integrității rocilor din acoperișul stratului productiv, costul de obținere a aburului etc.

Rezervoarele neconvenționale [3] (lucrarea prezentă se ocupă în exclusivitate de aceasta categorie) fac referire la hidrocarburi cantonate în roci cu matrice densă și la hidrocarburi cantonate în șisturi argiloase cu permeabilitate scăzută, sub 0,01 mD, și porozitate, scăzută, sub 3-6% iar mecanismul de producție este fracturarea hidraulică a sondelor multiple, săpate orizontal în același strat productiv - există bariere tehnologice generate de impactul (teran/subteran).

1.2. Hidrocarburi cantonate în zăcăminte șistoase și/sau matrici dense

Există mai multe viziuni /definiții. Conform ERCB/AGS [4] definiția gazului de șist, descrie cel mai bine rezervorul ca "fiind bogat în substanțe organice și fiind fin granulat" [5].

Termenul de "șist" nu descrie de fapt litologia reală a rezervorului. Variațiile litologice ale rezervoarelor de gaze de șist americane indică faptul că gazul natural este conținut nu numai în șisturi, ci și într-un spectru larg de litologie și textură începând de la argile și marne, până la gresii cu granulație fină, având în compoziție siliciu și/ sau carbonați. În general, o mare parte din ceea ce este descris ca șisturi reprezintă adesea argilă, sau cuprinde mai multe tipuri de roci, cum ar fi gresiile sau gresiile laminare intercalate cu lamine de argile. Mecanisme de stocare a gazelor - gazul adsorbit în materia organică și cel depozitat ca gaz liber în micropori și macropori. Laminările au un efect dublu deoarece, pe de o parte, stochează gazele libere, iar pe de altă parte vehiculează gazele de desorbție din materie organică din argilă, către gaura de sondă. După *Petroleum Technology Alliance of Canada*, 2005 [6], diferența dintre acesta și gazul de șist ar putea fi aceea că rezervoarele de gaze de matrice densă nu conțin, în general, materie organică [6], deci o diferențiere consistentă care poate fi urmărită.

Caracteristicile generale ale șisturilor ce conțin gaze

Există patru proprietăți fundamentale care caracterizează zăcămintele de gaze de șist: maturitatea materiei organice, tipul de gaz generat și stocat în rezervor (biogenic sau termogenic), cantitatea de carbon organic (TOC – *Total Organic Carbon*) și permeabilitatea rezervorului (tabelul 1.1 [7]).

Tabelul 1.1. Proprietățile gazelor de șist din patru bazine majore din SUA (modified after Faraj et al., 2004) [7]

Caracteristica	Barnett	Ohio si echivalent	Antrim	Lewis
Bazin	Fort Worth	Appalachian	Michigan	San Juan
Vîrstă	Mississippian	Late Devonian	Late Devonian	Late Cretaceous
Adâncime (picioare)	6500–8500	2000–5000	600–2000	3000–6000
Grosime (picioare)	200–300	300–2000	160	1000–1500
Grosime netă (picioare)	50–100	30–100	70–120	200–300
Temperatura la talpa (°F)	200	100	75	130–170
Gradient de presiune (psi/foot)	0.43–0.44	0.15–0.4	0.35	0.2–0.25
Maturitate (% R _o)	1.1–1.4	1–1.3	0.4–1.6	1.6–1.88
Total Carbon Organic (wt. %)	1–4.5	0.5–23	0.5–20	0.5–2.5
Porozitate (%)	1–6	2–5	2–10	.5–5
Saturatie în apă (S _w)	10–80	10–80	10–80	10–80
Conținut gaze (SCF/Tona)	300–350	60–100	40–100	15–45
Gaze adsorbite (% din total)	20	50	70	13–40
Producție Gaz (mcf/zi /sonda)	100–1000	30–500	40–500	100–200
Producție apă (Bbl/zi)	0	0	20–100	0
Gabarit sonda (acri)	80–160	40–160	40–160	80–320
Factor de Recuperare	8–15	10–20	20–60	5–15
Rezerve gaz (Bcf/sectiune)	30–40	5–10	8–16	90
Resurse (Tcf)	26.2	225–250	12–20	100

Pollastro et al. (2004).

După *Energy and Mines Minister's Conference „Responsible Shale Development: Enhancing the Knowledge Base on Shale Oil and Gas, în Canada 2013”* [8], guvernele sunt angajate într-o plajă largă de activități așa încât potențialul gazelor de șist să fie înțeles cât mai bine, pe de o parte, iar pe de altă parte, să fie mai bine înțelese implicațiile ce derivă din exploatarea acestora.

- **riscurile inerente** (unele din aceste riscuri fiind comune și activității de dezvoltare pentru zăcămintele de petrol și gaze convenționale), cu privire mai ales asupra calității apei, aerului, solului, seismicității induse, nivelul de zgomot și impactul asupra comunităților umane;
- **angajării efective** a părților interesate, respectiv guverne, companii, proprietari și public: comunicare, informare, consultare transparentă, implicare;
- **evaluării continue** a pachetelor legislative pe baze de **date științifice colectate** [8].

Marele dezavantaj al „revoluției gazelor de șist” care a devenit vizibil abia din anii 2000-2005, a fost dictat în principal de: lipsa totală de experiență în acest domeniu a operatorilor petrolieri din SUA; procesul de asimilare a datelor și de îmbunătățire a procedurilor „Work and Learn” sau „lucrează și învață

1.3. Situația în Europa

La nivelul Comisiei Europene, s-a constituit un grup de lucru multinațional având ca sarcină principală, realizarea unui studiu: **European Unconventional Oil and Gas Assessment (EUOGA) – Review of results, knowledge, gaps and recommendations for future Works** [9-10], studiu finalizat în Martie 2017. Obiectivele majore ale EUOGA sunt [9-10]:

- să dezvolte un sistem și o metodologie comună UE pentru evaluarea gazelor și petrolului de șist;
- să execute o evaluare efectivă pentru gazele și petrolul de șist din țările membre UE;
- să realizeze o baza de date UE și aplicații cartografice interactive *web based*.

Analizele, interpretările și concluziile exprimate în raport, reprezintă cea mai bună opinie aparținând *Geological Survey of Denmark and Greenland GEUS* și *TNO*. Toate analizele, interpretările, concluziile și opiniile sunt bazate pe materialele furnizate de către serviciile geologice naționale ale țărilor participante [10]

În cadrul proiectului EUOGA au fost analizate 82 de strate argiloase posibil purtătoare de hidrocarburi, în 21 de țări pentru care s-a realizat acest studiu de evaluare a potențialului de hidrocarburi neconvenționale. S-a folosit metoda de evaluare stohastică volumetrică asupra a 49 de formațiuni geologice, 15 conținând atât petrol cât și gaze, 26 conținând doar gaze iar 8, doar petrol. Rezultatul total al acestor estimări pentru cele 21 de țări cuprinse în studiu, a fost de 89,23 trilioane metri cubi de gaze și 31,4 miliarde de bari de petrol existent [11] (fig. 1.3.).

În tabelul 1.3 este prezentat totalul resurselor de hidrocarburi neconvenționale, însumate pe țări.

Tabelul 1.3. Totalul resurselor de hidrocarburi neconvenționale, însumate pe țări [11]

	Total gaz estimat (bcm)			Total petrol estimat (mld.bbl)		
	P90	P50	P10	P90	P50	P10
Austria*	898	2237	4863	0.06	0.35	1.97
Belgium	368	852	1842			
Bulgaria	2646	7177	16786	1.01	6.54	39.38
Croatia	1	2	5			
Czech Republic*	169	514	1269	0.03	0.18	1.04
Denmark	1317	2533	4488			
France				0.44	2.61	14.68
Hungary	287	813	1885	0.22	1.28	7.09
Italy				0.26	1.46	8.46
Lithuania	187	256	391	0.90	2.03	3.88
Netherlands	1254	2710	5872	0.25	1.38	7.36
Poland	6221	13243	26206	2.93	6.64	12.24
Portugal	412	1079	2480	0.32	1.77	9.94
Romania	3324	9714	26972			
Slovenia	83	195	411	0.04	0.21	1.13
Spain	798	2049	4700			
Sweden	257	482	823	0.02	0.06	0.16
UK	11844	35432	84984	0.67	4.16	24.44
Ukraine	3846	9949	23080	0.41	2.78	17.17
Total EU EUOGA		89235 bcm			31.4	Mld.bbl

Având date disponibile din experiența nord americană, EUOGA a considerat necesar și util de a include în studiu și compararea straturilor de șisturi argiloase din Europa, presupuse a fi productive, cu cele deja dovedite din America de Nord (tabelul 1.4) [9-10].

Proprietățile medii pentru toate șisturile argiloase europene și pentru argilele tipice din Carbonifer și Jurasic sunt luate în considerare pentru analogia cu șisturile argiloase nord-americane, cu privire la extensia laterală, grosime, *Carbon Organic Total* și maturitate.

Tabelul 1.4. Evaluarea parametrizării analogiei europene a șisturilor argiloase cu posibile gaze, cu șisturile argiloase nord-americane (bazate pe parametrizarea Jarvie 2012) [9]

	Argile cu valoare raportata	Mediu EUOGA	Min. EUOGA	Max. EUOGA	Mediu Paleo. EUOGA	Min. Paleo. EUOGA	Max. Paleo. EUOGA	Mediu Carbon. EUOGA	Min. Carbon. EUOGA	Max. Carbon. EUOGA	Mediu Jurasic EUOGA	Min. Jurasic EUOGA	Max. Jurasic EUOGA	Mediu N.America Argile	Min. N.America Argile	Max. N.America Argile
		2014 Mediu	2014 Min	2014 Max	2016 Mediu	2016 Min.	2016 Max.	2017 Mediu	2017 Min.	2017 Max.	2018 Mediu	2018 Min.	2018 Max.	2015 Mediu	2015 Min.	2015 Max.
1. Index Argila (CP)																
2. Grosime bruta	52	461	16	2800	353	20	2296	622	50	2800	165	30	650	147	55	366
3a. Grosime neta	57	143	8	1054	192	16	1504	140	30	495	162	8	650	83	41	152
2b. Net/ Brut	43	47	0	100	68	23	100	40	6	100	35	9	100	70	29	100
3. Adancime (m)	64	2372	30	6000	2195	30	4430	1875	1016	4500	2783	465	5500	2565	1311	3810
4. Densitate (g/cm3)	52	2,45	2,1	2,71	2,51	2,15	2,7	2,5	2,3	2,71	2,5	2,15	2,65			
5. TOC %	62	3,4	0,5	20	4,67	1,12	11	2,97	1	8,2	5	0,95	20	2,97	1,33	5,34
6. Porozitate (%)	27	4,69	1,5	11,8	4,79	2	7	3,76	1,5	10,1	6,47	4,2	11,8	6,33	4	10
7. Maturitate (%VR)	47	1,34	0,34	4	1,71	0,5	3	1,67	1,1	3,09	0,78	0,6	1,2	1,69	1,2	2,5
8. Pres. Rezervor psi	25	4093	350	13900	3926	435	7106	33012	370	6527	8189	4786	13900			
9. Temp rezervor C	26	94	15	165	74	15	135	97	62	125	126	78	150			
10. Saturatia in gaze (%)	19	28	3	67	56	21	67	14	3	55	37	23	50	63	40	90
11. Saturatie petrol (%)	7	14	0	70	5	0	6		0	0		0	0	4	1	15
12. H2 Index	40	246	2	658	255	55	513	155	30	346	373	6	570	30	10	80
13. Tip Kerogen	61	II			II			II / III			II			II		
14. Capacitate adsorbtie @ Vr 1,9%	2	0,18	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,15						
15. Permeabilitate matrice Nd	7	89	0	340	70	40	100	143	0	340	5	5	5	157	10	1000
16. Capacitatea de depozitare a gazului adsorbit	14	47	33	81	45	44	50	43	33	45	81	81	81			
17. Factor de compresibilitate	8	0,98	0,85	1,01	1	1	1,01	0,93	0,85	1						
18. Bg- Factor de formare al volumului de gaz	10	0,0112	0,0032	0,0212	0,0061	0,0032	0,0133	0,0155	0,0046	0,0212	0,0195	0,0195	0,0195			
19. Presiunea Langmuir (psi)	6	1230	305	3916	435	435	435	1739	395	3016	1290	1290	1290			
20. Volumul Langmuir (m3)	6	69	30	170	36	36	36	58	30	98	170	170	170			
21. Vol. mediu de argila (%)	29	47	0	80	51	51	56	50	5	80	34	0	53	31	17	51
22. Volum mediu cuarț feldspat (%)	29	32	4	69	33	33	46	39	15	69	28	4	43	44	17	69
23. Volumul mediu de Carbon (%)	29	21	1	96	1	1	11	11	5	26	39	23	96	25	6	67

A rezultat o diferență importantă, prin aceea că argilele europene au o porozitate medie de 4,9%, în timp ce argilele nord-americane au o porozitate medie de 6,3 % (cu alte cuvinte, argilele nord americane pot fi caracterizate ca optime pentru producție în timp ce argilele europene sunt situate sub optim). Din punct de vedere mineralogic, argilele nord-americane sunt dominate de componente non-argiloase, deci rația non-argilos / total argilă este mai mare decât 1, fapt ce nu există la argilele europene. Așadar, se poate afirma că există diferențe majore între șisturile argiloase din cele două continente, fondul argilos fiind dominant pentru șisturile europene. Acest fapt implică dificultăți mai mari pentru forajul, completarea și producția în sondele săpate în acest tip de rezervor. Ca atare, ar putea exista impedimente de inginerie serioase în legătură cu aplicarea unor procedee nord americane în Europa. [11].

Pe de altă parte, nu este de neglijat nici cantitatea mare de necunoscute din Europa. Datele sunt puține și bazate mai mult pe estimări, nu au existat programe majore de dezvoltare / producție a hidrocarburilor provenite din șisturi argiloase. Nu există niciun fond consistent de sonde stratigrafice din care să rezulte date actuale valabile care să îmbunătățească estimările existente.

1.4. Situația în România

Conform ANRM [13], România are o experiență de peste 150 de ani în industria de țitei și de peste 100 ani în industria gazelor naturale, în toate sectoarele de activitate specifice: geologie și geofizică; explorarea zăcămintelor; forajul sondelor și exploatarea țiteiului și gazelor; prelucrarea hidrocarburilor (rafinare, petrochimie ș.a.); colectarea,

transportul, depozitarea și distribuția țițeiului, gazelor și produselor petroliere; utilaje și sculelor specifice; servicii complementare; protecția mediului; legislație; cercetare științifică, proiectare, educație și formarea de specialiști.

Activitatea industriei petroliere în România este reglementată de un sistem complex de legi naționale și un sistem European [13].

Din punct de vedere geologic, în România există două zone gazifere majore: bazinul Transilvaniei și platforma Moesică.

- **Bazinul Transilvaniei** este cea mai importantă zonă cu acumulări de gaze din România. Acest bazin sedimentar este cel mai important producător de gaze naturale din Europa de Sud-Est (Popescu 1995). Zăcămintele de gaze sunt poziționate între Miocenul mediu și Pliocenul inferior (după Paraschiv 1979 și Popescu 1995). Nivelul stratigrafic respectiv se numește „formațiunile purtătoare de gaz”, dar acestea au acumulat doar gaz metan de origine biogenă. În Bazinul Transilvaniei 99% din gaze reprezintă CH₄, și are origine biogenă, deoarece nu s-a atins maturitatea pentru stadiul termogenic. Până astăzi s-au descoperit, în Transilvania, 120 de zăcămintele de gaze, 13 dintre acestea fiind descoperite înainte de 1950 [14].
- **Platforma Moesică**, mai exact partea de Nord a Platformei Moesice, este în sectorul geografic al României în timp ce partea de Sud, se află între frontierele Bulgariei.

În sectorul Românesc, Platforma Moesică acoperă 43 000 km² și este mărginită către Nord de orogenul carpatic, orogenul balcanic și orogenul Nord Dobrogean către Sud, iar către Est acoperă platforma continentală a Mării Negre. Platforma Moesică este unul dintre cele mai importante bazine pentru hidrocarburi din România. Acest bazin major de sedimentare întrunește toate condițiile geologice pentru geneza, migrarea și acumularea de hidrocarburi. În ceea ce privește stadiul de explorare, mulți autori consideră Platforma Moesică ca fiind matură, dar conținând și zone insuficient cunoscute din punct de vedere al hidrocarburilor (Paraschiv 1979, Popescu 1995, Pene și colectivul 2006). Acest bazin sedimentar este caracterizat prin existența a cel puțin trei sisteme de hidrocarburi efective, două dintre ele fiind de origine termogenică, reprezentate prin sisteme paleozoice și mezozoice, precum și un sistem biogenic reprezentat de neogen (Paraschiv 1979, Pene și colectivul) [14].

Explorarea convențională a început în anii 1950. În 1956, a fost forată prima sondă care a penetrat prima acumulare de hidrocarburi. Până în prezent s-au înregistrat 145 de descoperiri.

Referitor la gazele de șist, se remarcă depozitele siluriene cu trei posibile sisteme în Platforma Moesică: Călărăși Sud Dobrogea, Optași Alexandria și Lom-Băilești (Veliciu și Popescu în 2012 au estimat resursele de gaze de șist din aceste trei posibile acumulări în conformitate cu metodologia emisă de US Geological Survey în 2010 [14]).

Din punct de vedere tehnic, în România nu s-au executat foraje legate de explorarea și exploatarea gazelor de șist. De asemenea nu există o bază tehnologică națională care să asigure servicii specializate pentru acest domeniu. Din nefericire nu există niciun fel de precedent de inginerie aplicată efectiv care să confere un grad de experiență minimă în acest domeniu.

Este de remarcat că tehnologia aferentă există pe piață, putând fi accesată de la marile companii de servicii petroliere care activează în prezent în România: Schlumberger, Halliburton, PackersPlus, Weatherford, NOV, etc. Compania americană Chevron a deținut patru acorduri petroliere pentru gazele de șist, obținute prin concesionarea (în urma ofertei depuse în Runda X/2009) a trei perimetre în Dobrogea de Sud, cu ieșire la Marea Neagră, în suprafață totală de 2.700 km² (= 270.000 ha), prin trei acorduri petroliere de concesiune pentru explorare-dezvoltare-exploatare, încheiate între ANRM și Chevron România Holdings B.V. (subsidiara olandeză a companiei americane Chevron):

Din nefericire, datorită adversității fără precedent manifestate față de lucrările de explorare (cel puțin în prima fază), Compania Chevron, a sistat definitiv orice lucrare / intenție de investiție în România, retrăgându-se definitiv din Acordurile de Concesiune semnate cu ANMR, și plătind statului Român penalități și compensații de circa 73 milioane USD.

1.5. Aspecte tehnice specifice

Așa cum am prezentat anterior, experiența efectivă în legătură cu proiectarea, forajul, completarea și producția sondelor de hidrocarburi din zăcămintele neconvenționale a fost și este adusă la scară practică doar în America de Nord, respectiv SUA și Canada. Toate aceste elemente, care fac parte din ciclul de viață al sondei, sunt puse în practică în strânsă corelare cu impactul lor asupra mediului – sol – subsol – apă – aer – bio habită – comunități umane, urmărindu-se diminuarea riscurilor asociate cât mai mult cu putință.

Actualmente, legislația tehnică canadiană constă în standarde API și Coduri recomandate pentru practica este extrem de complexă și toți operatorii petrolieri sunt obligați să se conformeze.

Autorizația pentru foraj - *Drilling Permit*

Este un document fără de care, indiferent de țară, forajul unei sonde nu este permis. Indiferent de titulatura legală a acestui document, obținerea lui necesită o activitate intensă efectuată de grupuri multidisciplinare care se ocupă atât de suprafață (construcții, facilități, QHSE (*Quality Health Safety Environment* sau calitate, sănătate, siguranță, mediu), legal, achiziții, logistică etc.) cât și de subsol (geofizică, geologie, inginerie de zăcămint, foraj, completare și testare).

În practică, procesul de pregătirea documentațiilor care fac obiectul aprobării unei autorizații pentru foraj este atât de complex, încât chiar marii operatori petrolieri fac apel la firme de consultanță specializate care să se ocupe exclusiv de anumite aspecte

Locația sondei – *Padul de foraj*

Alegerea locației sondei este deosebit de importantă, atât pentru viața ulterioară a proiectului (foraj – completare- testare-probe-producție, cât și pentru relația viitoare cu părțile interesate: proprietari, agenții guvernamentale, agenții locale etc. Alegerea locației se face în urma unei adevărate activități de cercetare în teritoriu (*Scouting*), pe baza datelor obținute realizându-se proiectul locației.

Elementele de bază privitoare la amplasarea utilajelor instalației de foraj și a anexelor aferente sunt prezentate în figura 1.6.

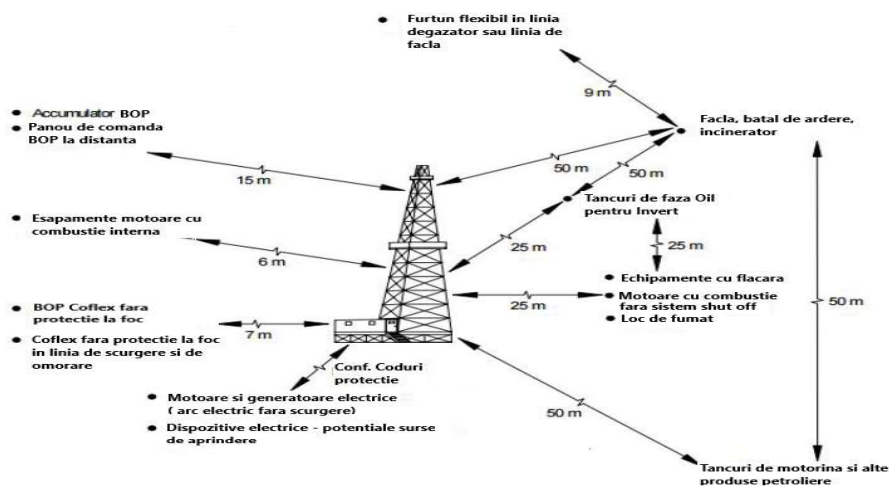


Fig. 1.6. Spațierea instalației de foraj și utilajele aferente [17]

Alegerea și dimensionarea corectă pentru o locație de foraj trebuie să ia în considerare și necesitățile rezultate din activitatea de producție ulterioară și, eventual, a dezvoltării, dacă există planuri de dezvoltare, distanțele minime legale față de: conductele de țiței și gaze existente; facilitățile de producție existente; căile ferate; construcțiile civile; sonde / puțuri de apă; case și alte premise private; așezăminte sociale; limita urbană, sat, comună; oraș, linii electrice de înaltă tensiune; instalații militare; facilități și instalații portuare și aeroportuare; alte elemente conform legislației în vigoare.



Fig. 1.7. Determinarea amprentei la sol a zonei de lucru - 5 dimensiuni [16]

La stabilirea dimensiunilor zonei de lucru pentru padul de foraj, sunt deosebit de importante spațiarea capetelor de sonde, respectiv direcția și numărul acestora. Odată stabilite aceste cinci dimensiuni, ele se pot integra în orice platformă de imagistică și topografie[16], precum și cu integrarea activităților subsecvente de producție.

Sonde pentru extracția hidrocarburilor de șist și/ sau matrice densă

Necesitatea aplicării forajului de sonde multiple orizontale din același *pad* a rezultat din considerente economice, de protecția mediului ambiant și de impact asupra acestuia, viteza operațiilor, ca și din considerente de inginerie de zăcământ respectiv pentru mărirea gradului de deschidere a sondelor, deci mărirea implicită a volumului rezervorului stimulat.

De obicei, forajele se pot executa cu una sau două instalații de foraj, fiecare abordând o linie de șir de sonde și având, obligatoriu, capabilități de mișcare rapidă pe locație, respectiv fiind dotate cu dispozitive de pășire sau dispozitive de lunecare (*Walking system & skidding system*).

Fracturarea hidrolică este componenta fundamentală care a făcut fezabilă exploatarea gazelor de șist și /sau matrice densă. Pânza de apă freatică este protejată în timpul fracturării și în timpul producției printr-o serie de coloane metalice, cimentate în spatele coloanelor (în spațiul inelar).

Este de remarcat că, în medie, pentru o fracturare hidrolică sunt necesari între 15 000 și 20 000 m³ de apă. De aceea este obligatoriu să fie stabilite din timp sursele potențiale de apă pentru aceste fracturări. După operațiunea de fracturare hidrolică, apa folosită în proces, revine la suprafață o dată cu extracția gazelor și, de aceea, operatorii trebuie să posede resursele tehnice specifice pentru a gestiona aceste volume fără să producă poluarea surselor de apă existente.

Forajul acestor sonde se execută din paduri multi-sonde, din care se sapă pentru fiecare sondă o secvență de găuri / secțiuni sau faze de foraj, consolidându-se cu coloane metalice cimentate (după caz). (fig.1.23).

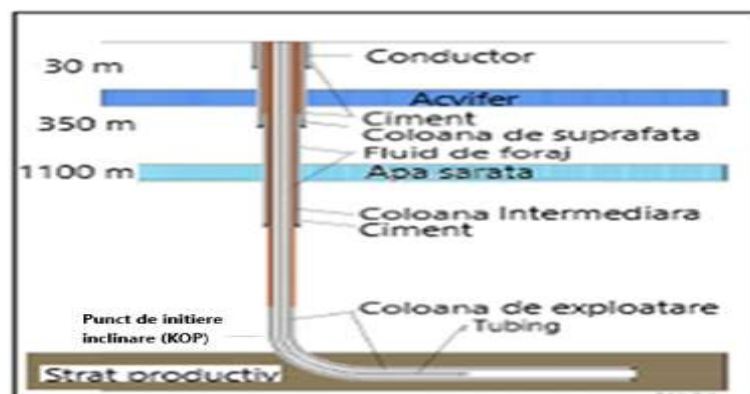


Fig. 1.23. Exemplu de sondă orizontală

Coloana de ghidare (conductor) tubează primii 30 - 50 m de la suprafață; se cimentează sub presiune în spate complet și are un rol fundamental în stabilitatea instalației de foraj la gura sondei precum și contribuție esențială la protejarea solului, protejarea pânzei de apă freatică; în funcție de jurisdicție, coloana conductor, poate fi instalată și prin bătaie cu ciocan hidrolic, până la adâncimea zisă de refuz. Se poate folosi un *diverter*, care are rol de salvare în zonele cu gaze de suprafață.

Coloana de ancoraj (suprafață) – poate fi în clasa de diametre de 7 in; 9 5/8 in; 10 3/4 in; 13 3/8 in; 18 5/8 in. Cu ajutorul ei se tubează, în mod normal, primii 100 până la 600 m (pot fi, desigur, și excepții care să depășească 600 m adâncime) și se fixează la circa 25 m sub adâncimea pânzei de apă freatică, într-un strat geologic compact, se testează la presiune interioară și trebuie să asigure următoarele funcții: integritatea hidrolică; protejarea și izolarea formațiunilor, inclusiv protecția acviferului; protejarea la eroziune hidrolică; oferă soluții pentru eventualele probleme de foraj cum ar fi pierderile de circulație, instabilitatea formațiilor; controlul sondei în caz de aflus din strat – posibilitate de închidere/omorare a sondei ș.a.

Proiectarea acestei coloane are la baza :

Ipooteze de calcul:

- a) se acceptă un aflus din strat de 3 m³ ce poate fi circulat la suprafață fără a fractura formațiunea de la sabot;
- b) presiunea la sabotul coloanei de suprafață este o relație lineară între 50 % din presiunea maximă la talpă la o sondă de 0 metri

adancime verticală (TVD) și 27,5 % din presiunea maxima la talpă pentru o sondă cu adancimea verticală de 3600 m (TVD);

c) este folosit un gradient de fisurare de 10 kPa/m la sabotul coloanei de suprafață la 450 m adâncime. Valoarea maximă a gradientului de fisurare este de 22 kPa/m.

Adâncimea efectivă se poate calcula utilizându-se procedura prezentată în Directiva 8 *Alberta Energy Regulator* [19]. Dimensionarea burlanelor pentru coloana de suprafață se poate face utilizându-se Directiva 10 *Alberta Energy Regulator* [20] care, de fapt, este un calcul de dimensionare la solicitări combinate (tabelul 1.8).

Tabelul 1.8. Metoda alternativă de proiectare a coloanelor de ancoraj [20]

Coeficienți minimi de proiectare	Condiții de încărcare	Presiune interioară / fluid	Presiune ext./fluid
1	Colaps	Suprafață: 0 kPa Fluid: Evacuare totală (1)	Suprafață: 0 kPa Fluid: Densitatea fluidului la sabot
1,1 1,2 (3) 1,25(3) 1,25(4) Se completează cu IRP 1 Secțiunea Materiale	P.int dacă pp H2S < 0,3 kPa P.int. dacă 0,3 <= pp H2S <= 10 kPa și Pp CO2 <= 2000 kPa P.int. dacă pp H2S > 10 kPa P.int. dacă pp H2S >= 3500 kPa Nota: pp H2S bazată pe presiunea interioară maximă a coloanei la suprafață(2)	Suprafață: cea mai mică valoare dintre: Gradientul presiunii de fisurare la sabotul coloanei de suprafață asumând 22kPa/m sau valoare efectivă din sonde de offset și Presiunea de formație maximă în secțiunea următoare – gradientul gazului . Se poate considera si 0,85 x Presiunea de Formație Maximă	Suprafață : 0 kPa Fluide : 10 kPa/m
1,75 conexiuni API 1,6 conexiuni Premium cu etanșare metal/metal 1,6 corpul burlan Tensiune admisibilă	Tensiunea rezultată din greutate coloană de burlane imersată	Suprafață : 0 kPa Fluid: Densitatea fluidului la sabot	Suprafață : 0 kPa Fluid: Densitatea fluidului la sabot

Observații:

- 1) *Evacuarea totală a coloanei poate apare în cazul pierderilor severe de circulație.*
- 2) *Intenția este de a avea presiunea int. maximă a coloanei de suprafață mai mare decât presiunea maximă la suprafață*
- 3) *Materiale în con. Cu anexa B*
- 4) *Materiale conforme cu IRP 1 Secțiunea 4*

Coloana (coloanele) intermediară(e) – pot fi în clase de diametre de 13 3/8 in; 9 5/8 in; 7 in

Se tubează de la suprafață până în capul stratului productiv sau de la suprafață până la cota de adâncime la care straturile nu mai au gradienti de fisurare compatibili ori se traversează straturi cu presiuni ridicate dar care nu fac parte din ținta geologică. Se pot tuba integral sau parțial – *linere* intermediare. În funcție de tipul sondei, presiunile întâlnite și ținta geologică, se cimentează în spatele coloanei integral la suprafață sau în spațiul inelar aferent coloanei de suprafață sau coloanei intermediare precedente.

Pe acest tronson pot apare intensități ale devieri (DLS) de peste 17 grade/ 30 m. Aceasta implică tensiuni suplimentare de încovoiere/ compresiune, atât în corpul burlanelor cât și în conexiuni. Datorită valorilor mari ale DLS, uzura acestei coloane în timpul forajului secțiunii orizontale va fi extrem de pronunțată, cu impact major (așa după cum se va vedea ulterior) în programele de completare, testele de presiune și programele de stimulare. Proiectarea efectivă pentru această coloană se face la solicitări combinate și se pot lua în considerare, cu succes, coeficienții de siguranță și ipotezele de proiectare recomandate în Directiva 10 AER [19] (tabelul 1.9).

Tabelul 1.9. Metoda alternativă de proiectare a coloanelor intermediare [20])

Coeficienți minimi de proiectare	Condiții de încărcare	Presiune interioară / fluid	Presiune ext./fluid
----------------------------------	-----------------------	-----------------------------	---------------------

1	Colaps	Suprafață: 0 kPa Fluid: Evacuare până la 0,5 TVD pt. următoarea lungime de coloană la adâncimea sabot, cu cel mai ușor fluid după frezarea sabotului (1)	Suprafață: 0 kPa Fluide: densitate noroi foraj la adâncimea de fixare a sabotului coloanei/linerului(2)
1,1 1,2(3) 1,25(3) 1,25(4) IRP 1 Sec. 24	Pres. Int. dacă $ppH_2S < 0,3$ kPa Pres. Int. dacă $0,3 \leq pp H_2S \leq 10$ kPa și $pp CO_2 \leq 2000$ kPa Pres. Int. dacă $pp H_2S > 10$ kPa Pres. Int. dacă $pp H_2S > 3500$ kPa	Cea mai mică valoare dintre: Presiunea de formație maximă minus gradientul gazului la orice adâncime Sau Presiunea din Gradientul de fracturare la sabot: 22 kPa/m minus gradientul gazului până la zi. Sau Presiunea de formație maximă x 0,85 pentru sonde cu TVD > 1800 m Sau Presiunea de formație maximă x 0,9 pentru sonde cu TVD ≤ 1800 m Fluide : Se asumă gradientul gaz	Suprafață: 0 kPa Fluide : 10 kPa/m
1,75 – Conexiuni API 1,6 - Conexiuni Premium cu etanșare metal/metal 1,6 – Corp Burlan tensiune admisibilă	Sarcina imersată cu tensiunea rezultată din presiune x aria corpului	Suprafață : 0 kPa Fluide : Densitatea noroiului de foraj la sabotul coloanei/linerului	Suprafață : 0 kPa Fluide: Densitatea noroiului de foraj la sabotul coloanei/linerului

Observații:

- 1) Este bine de luat în considerare și cazul în care coloana intermediară este evacuată total;
- 2) Zonele cu presiune ridicată / permeabilitate scăzută trebuie să fie luate în considerare în măsura în care se cunosc pentru definirea presiunii exterioare;
- 3) Materiale cu specificații conform Anexei B;
- 4) Materiale cu specificații conform IRP 1;
- 5) TVD – *True Vertical Depth* – Adâncimea Verticală Măsurată;
- 6) pp – presiune parțială

Coloana de producție (liner de producție) – poate fi în clase de diametre de 7 in; 5 ½ in; 5 in; 4 ½ in; 4 in

Se tubează de la suprafață până la adâncimea finală (dacă este coloană întreagă), acoperind în totalitate drenul orizontal. În funcție de programul de completare (*open/cased hole completion- completare in gaura liberă sau gaură tubată*) și stimulare ulterioară, aceasta coloana/liner poate fi tubată, fiind pregătită în avans, de la suprafață cu diferite pakere de coloană pentru gaura liberă, valve pentru cimentare și circulație, perforaturi, fante, șlițuri protejate sau nu, cu elemente de filtrare. Dacă este vorba despre liner de producție, acesta se tubează de la adâncimea finală a sondei până în interiorul coloanei intermediare de obicei pe secțiunea tangentă, așa încât să facă ușoara agățarea – ancorarea linerului de producție.

Coloanele / linerale de producției pot fi cimentate integral, parțial, sau necimentate, în funcție de programul de completare ulterior.

De obicei secțiunile orizontale de producție sunt deosebit de lungi, putând depăși chiar 4000 metri deci este de înțeles că gaura trebuie să se prezinte în condiții foarte bune, iar fluidul de foraj trebuie să asigure un factor de frecare cât mai mic.

Integritatea coloanei de producție este crucială dat fiind ciclul de viață al sondei (un orizont de timp mediu de 25 de ani de producție).

Proiectarea efectivă pentru aceasta coloană se face la solicitări combinate și se pot lua în considerare cu succes coeficienți de siguranță și ipotezele de proiectare recomandate în Directiva 10 AER [20] (tabelul 1.10)

Tabelul 1.10. Metoda alternativă de proiectare a coloanelor de exploatare [20]

Coefficienți minimi de proiectare	Condiții de încărcare	Presiune interioară / fluid	Presiune ext./fluid
1,0	Colaps	Suprafață : 0k Pa Fluide : Evacuare totală	Suprafață : 0k Pa Fluide: Densitate noroi la sabotul coloanei(2)
1,1 1,2(4) 1,25(4) 1,25(5) IRP 1 Sec.4	Pres. ext. dacă $pp\ H_2S < 0,3$ kPa Pres. ext. dacă $0,3 \leq pp\ H_2S \leq 10$ kPa and $pp\ CO_2 \leq 2000$ kPa Pres. ext. dacă $pp\ H_2S > 10$ kPa Pres. ext. dacă $pp\ H_2S \geq 3500$ kPa	La suprafață: cea mai mică valoare dintre: pres. maximă de formație minus gradientul gazului la orice adâncime (3); pres. maximă de formație x 0,85 pentru sonde cu TVD > 1800 m; pres. maximă de formație x 0,9 pentru sonde cu TVD ≤ 1800 m. Linere de producție: presiunea la capul linerului este > ori = cu presiunea maximă de formație anticipată minus gradientul gazului metan la capul linerului și ia în considerare gradientul fluidului de paker. Se vor lua în considerare presiunile din programele de stimulare.	Suprafață : 0k Pa Fluide: cea mai mică valoare dintre: 10 kPa/m gradient sau presiune din pori cunoscută <i>Notă: În cele mai multe cazuri, gradientul presiunii exterioare este echilibrat de gradientul fluidului de packer (6).</i>
1,75 – Conexiuni API 1,6 – Conexiuni Premium cu etanșare metal/ metal 1,6 – Corp burlan - tensiune admisibilă	Sarcina imersată cu tensiunea rezultată din presiune x aria corpului	Suprafață: 0 kPa Fluide: densitatea noroiului de foraj la sabotul coloanei	Suprafață: 0 kPa Fluide: densitatea noroiului de foraj la sabotul coloanei

Observații:

1) Un *liner* de producție poate fi instalat doar dacă coloana intermediară anterioară satisface condițiile unei coloane de exploatare. Dacă nu satisface aceste condiții atunci nu se poate instala un liner, ci coloană întreagă de producție.

2) Zonele de presiune înaltă, zonele de permeabilitate redusă dacă sunt cunoscute, trebuie considerate din punct de vedere al presiunii exterioare.

3) Metoda *Cullender & Smith* este oferită ca și metodă standard pentru calculul presiunii statice la talpa sondei în aceasta directivă. Poate fi aplicată la sonde adânci, cu H_2S . Poate fi folosită orice altă metodă de calcul care se bazează pe principii solide de inginerie.

4) Materiale conform IRP 1 Sect. 4.

5) Coloana / *linerul* de producție este proiectat pentru o presiune aplicată de la suprafață (pe lângă presiunea hidrostatică coloanei de fluid) – presiunea rezultată din gradientul coloanei de gaze.

În concluzie, se poate afirma (și experiența o confirmă!), că metoda alternativă de proiectare a coloanelor de burlane, așa cum este precizată în Directiva 10 - *Alberta Energy Regulator alături de Industry Recommended Practice 1 – Secțiunea 4*, la care se adaugă verificarea coloanelor de burlane la solicitări combinate (presiune exterioară și tracțiune), precum și influența încovoierii asupra tracțiunii, oferă o bază solidă de proiectare a coloanelor de burlane de orice fel și pentru orice tip de sondă.

Completarea sondei

Programul de completare și stimulare a sondelor pentru hidrocarburi din șisturi argiloase sau matrice densă se face în paralel cu proiectarea coloanei de exploatare. În figura 1.25 este prezentată o schemă standard de echipare a unei sonde orizontale cu zece intervale de fracturare.

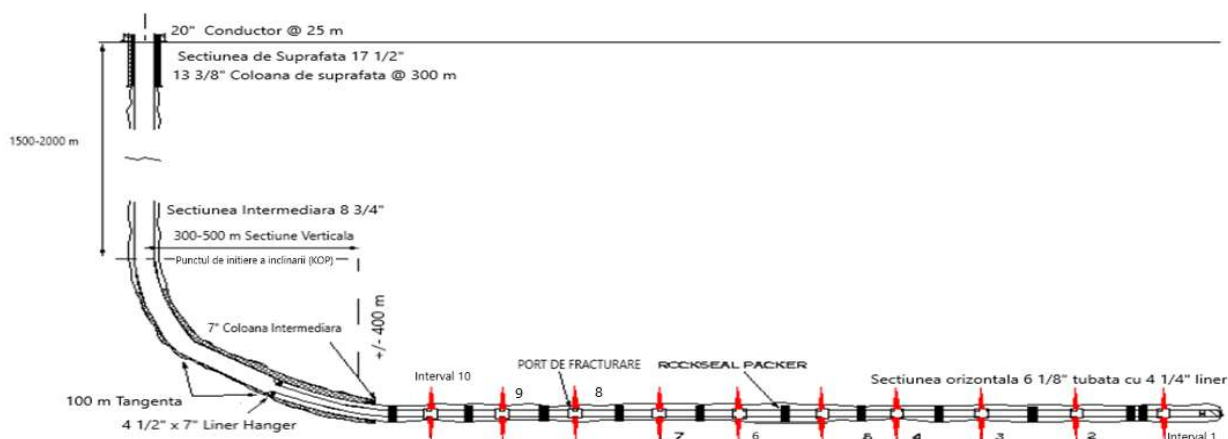


Fig. 1.25. Schema standard de completare a unei sonde orizontale cu 10 intervale de fracturare

Sistemele de completare secvențială de tip PakerPlus sunt deosebit de performante, dar în același timp fiind scumpe, gaura de sondă trebuie să fie foarte bine pregătită înainte de a le introduce și a le instala în poziția necesară în sondă.

Măsurile de optimizare a instalării privesc: evaluarea calității găurii de sondă; micșorarea micro DLS și distrugerea posibilelor găuri de cheie prin corectarea găurii de sondă și lărgirea găurii de sondă dacă este necesar; micșorarea coeficienților de frecare prin adăugare de compuși lubricanți în fluidul de foraj; efectuarea de carotaje de corelare; poziționarea corectă a echipamentelor / treptelor pentru fracturare conform cu rezultatele diagramelor de carotaj; simularea introducerii și instalării echipamentelor prin utilizarea unor modele matematice specifice astfel ca să se predetermine viteza de introducere, apariția flambajului, determinarea forțelor laterale ce apar în garnitura de completare.

Fracturarea hidraulică

După terminarea forajului orizontal, respectiv după ce coloana de exploatare a fost tubată și eventual cimentată, fracturarea hidraulică este folosită pentru crearea unui sistem de fracturi și fisuri în formațiunile de șisturi argiloase, respectiv în roci cu matrice densă, permițând astfel țițeiului și gazelor să curgă în sondă. Acest procedeu, ca și principiu, a fost aplicat încă din anii 1950 în SUA, fiind optimizat și îmbunătățit permanent, astfel că și la ora actuală reprezintă un element-cheie în stimularea sondelor de petrol și gaze.

Fracturarea hidraulică începe de la talpa sondei (finalul drenului orizontal) înspre înapoi, către capul stratului productiv, de obicei acolo fiind instalat sabotul coloanei intermediare. În figura 1.26 este prezentată schema unei sonde orizontale fracturate.

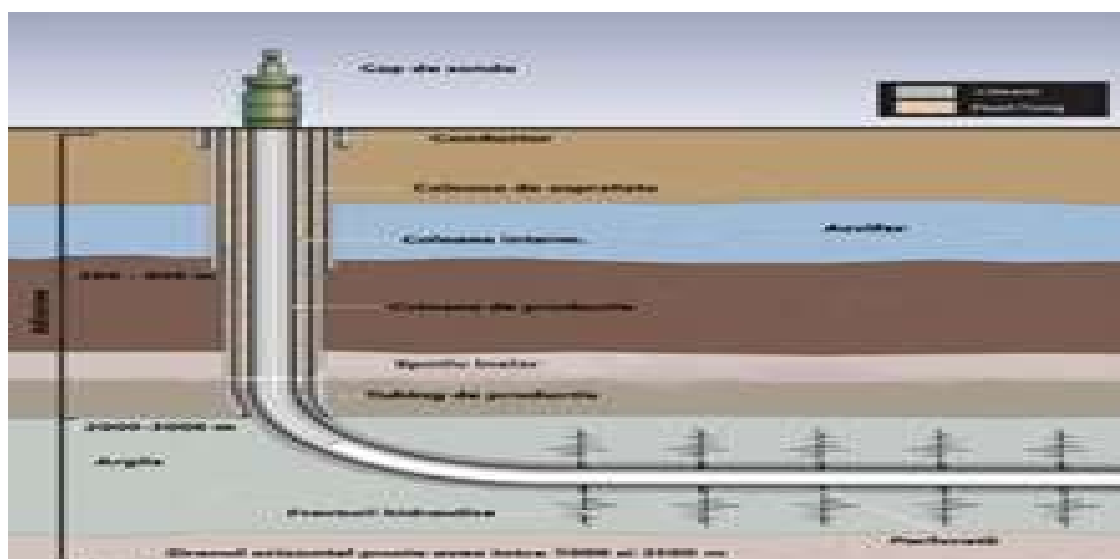


Fig. 1.26. Schema unei sonde orizontale fracturate

Deschiderea coloanei de producției către stratul productiv este asigurată fie prin perforare cu diferite sisteme și tehnologii de perforare, fie prin deschiderea hidrolică a unor fante de comunicare (*porturi*) cu care coloana de exploatare a fost prevăzută inițial, dacă această coloană nu este cimentată. În continuare se pompează un amestec de apă, propant (nisip sau diferite substanțe ceramice granulare) și alte substanțe cum ar fi inhibitori de coroziune, reducători de frecare etc, creându-se astfel o rețea de fracturi în jurul coloanei de exploatare. Cum drenurile orizontale pot ajunge și la 2500-4500 m lungime, fracturarea se execută în trepte sau intervale de fracturare. Astăzi, în industrie s-a ajuns și pînă la 50 de astfel de trepte de fracturare.

Ținta oricărei operații de fisurare hidrolică, este aceea de maximizare a volumului din rezervor stimulat de-a lungul drenului orizontal, pentru o spațiere a sondei dată, așa încât să se maximizeze producția de hidrocarburi din zona de interes. Aceasta depinde, în principal, de: orientarea și lungimea drenului orizontal; plasamentul capetelor de sondă; proprietățile mecanice ale rocilor; numărul de intervale de fracturare și izolarea lor, unele față de altele; alegerea fluidului de perforare și a propantului [21].

Pentru proiectarea unei operațiuni de fracturare trebuie să se țină seama de următoarele date esențiale: porozitatea și permeabilitatea formațiunii; lungimea drenului orizontal; fragilitatea vs. ductilitatea rocii; modulul lui Young; rația lui Poisson pentru rocă; rezistența la fracturare; grosimea stratului; barierele existente; adâncimea stratului subiect; stresul geologic în rezervor; direcția principală a stresului; litologia stratului productiv; anizotropia stresului; fracturi naturale existente; conținutul de gaze / lichide în rezervor; temperatura rezervorului; presiunea în rezervor. De regulă, aceste date sunt obținute din sonde stratigrafice-pilot forate în zonele de interes, prin extragere de carote urmată de analiza lor ulterioară, atât prin efectuare de investigații și măsurători geofizice în gaura de sondă, cât și prin teste de pompare în gaura de sondă. Aceste date, alături de proiectul traiectului de sondă, sunt introduse în modelele matematice care simulează procesul de fracturare pentru diferite valori ale debitului de pompare și pentru diferite scheme de perforare.

În figura 1.27 este prezentat un exemplu de model de fracturare *Chesapeake Energy* [21].

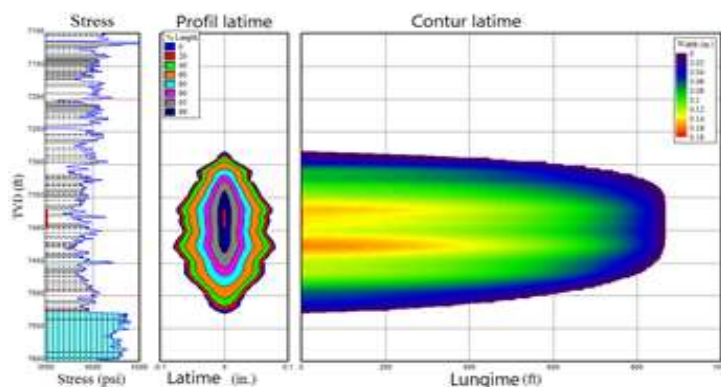


Fig. 1.27. Exemplu model de fracturare Chesapeake Energy [21]

Observații:

- 1) Fractura se găsește între intervalele de stress scăzut și ridicat;
- 2) Stresul variabil în secțiune indică schimbarea de litologie;
- 3) Cu cât fractura este mai înaltă, cu atât lungimea fracturii va fi mai mică [21].

Fluidul de fracturare

Actualmente, componenții care se folosesc la fabricarea fluidelor de perforare sunt, în marea lor majoritate, substanțe folosite pe scară largă în consumul alimentar, industria cosmetică, detergenți de bucătărie, compuși alimentari, dedurizatori de apă, deci compuși extrem de „casnici”, dacă îi putem numi așa. În tabelul 1.11 sunt prezentați principalii componenți pentru fluidele de fracturare și aplicațiile lor comune [22],

Tabelul 1.11. Componenți pentru fluide de fracturare și aplicațiile lor comune [22]

Component	Scop	Aplicații comune
Acizi	Ajută la dizolvarea unor minerale și inițializează fisurile în roci	Curățitori pentru piscine
Clorură de sodiu	Permite ruperea întârziată a lanțurilor de gel polimeri	Sare de masă
Poliacrilamidă	Minimizează frecările între fluid și țevi	Tratarea apei, condiționare soluri

Etilen glicol	Previne formarea depozitelor de rugină în țevi	Curățător de bucătărie, industria auto anti congelant.
Săruri borați	Menține vâscozitatea la temperaturi ridicate	Detergent, săpunuri, industrie cosmetică
Carbonați de sodiu și potasiu	Menține acțiunea activă pentru alți constituenți	Detergent, săpunuri, dedurizator apă
Glutaraldehide	Elimina bacteriile din apă	Dezinfectant și agent de sterilizare echipament medical și dentar
Gumă guar	Ajută la suspensia nisipului / propantului în apă	Folosit la pasta de dinți, patiserie, cosmetice
Acid citric	Previne precipitarea oxizilor de metale	Aditiv în industria alimentară – Suc de lămâie
Isopropanol	Crește vâscozitatea fluidului de fracturare	Industria cosmeticelor, deodorant, colorant pentru păr

Din punct de vedere al proiectării, fracturarea hidrolică este un proces extrem de sensibil, multidisciplinar, care folosește foarte multe variabile și foarte multe date de subsol. Cu cât baza de date va fi mai mare și mai reală, cu atât modelarea fracturării hidrolice va fi mai aproape de realitate.

Din punct de vedere practic al execuției efective, fracturarea hidrolică este o operațiune de anvergură implicând importante resurse tehnice, resurse umane, mijloace logistice, de aceea trebuie să fie programată cu foarte mare atenție, ținându-se cont de situația efectivă în șantier, ca și de toți posibii factori perturbatori.

1.6. Riscuri generate de exploatarea hidrocarburilor de șist și/sau matrice densă

Riscurile generate de exploatarea acestor hidrocarburi constituie un subiect actual și se pare că reprezintă un „document permanent” pe masa guvernelor, agențiilor de specialitate, grupurilor ecologice și, bineînțeles, un subiect de gândire major pentru opinia publică. Practica a demonstrat că o sondă „clasică” neexecutată corect poate induce mai multe riscuri decât o sondă pentru exploatarea hidrocarburilor neconvenționale. Există câteva elemente definitorii în modul în care pot fi depistate riscurile, modul în care sunt contabilizate, raportate și reduse prin măsuri specifice.

Din nefericire, operatorii petrolieri în marea lor majoritate și indiferent de zona geografică și legislația în care operează, nu au ținut cont de o serie de factori definitorii precum:

- verificarea condițiilor pre-existente de suprafață și subterane pentru locațiile/ padurile de foraj și vecinătățile acestora;

- monitorizarea permanentă a condițiilor pre-existente pe durata ciclului de viață a sondelor în discuție;
- aplicarea legislațiilor în vigoare pe bază de date științifice și tehnice colectate prin monitorizare;
- implicare și transparență în relațiile cu toate părțile interesate.

În mod firesc, o analiză de risc pertinentă înseamnă identificarea riscurilor generate de ciclul de viață al sondei și de aplicarea unei matrice de risc pentru fiecare fază, cu precizarea clară a metodelor de reducere pentru acestea.

De remarcat este faptul că majoritatea grupelor de riscuri de mai sus sunt comune pentru forajul și exploatarea hidrocarburilor convenționale, și nu sunt generate neapărat de fracturarea hidrolică.

➤ Degajarea de emisii și noxe în aer.

Este un risc comun activității umane legat atât de procesele industriale, cât și de funcționarea motoarelor termice de orice fel. În șantierul de petrol și gaze, aceste riscuri se diminuează prin poziționarea echipamentelor astfel încât gazele emise să nu fie sub vântul predominant în direcția în care se află colectivitățile umane; se folosesc catalizatori în motoarele cu ardere internă, multe instalații de foraj diesel electrice au convertit generatoarele din acționare Diesel în acționare cu gaz metan. De asemenea, operatorii au pus în practică, pe scară largă, programe de CO₂ *sequestration* (captare), fie prin captare directă și folosirea CO₂ -ului în procese industriale, fie prin injecție tehnologică în startul productiv.

➤ Trafic și căi de acces.

Acolo unde există sau vor exista condiții de trafic greu, operatorii au pus în practică orare de trafic, îmbunătățirea și consolidarea căilor de acces sau construirea altora noi, udarea căilor de acces de așa manieră încât praful să fie cât mai redus. Această activitate se realizează de obicei cu implicarea și dialogul strâns cu comunitățile locale. Pe de altă parte, forajul de sonde multiple din același pad a redus considerabil impactul asupra mediului.

➤ Fluidele de foraj – detritus

Forajul multi-sonde în *pad*, a favorizat recuperarea și reutilizarea fluidului de foraj, precum și separarea finală, reutilizarea apei de bază sau vinderea fazei țitei. Detritusul rezultat este fie injectat în sonde tehnologice săpate pentru acest scop, fie este tratat la parametri aprobați, așa încât să poată fi măcinat și folosit în construcția de drumuri, fie este transportat și depozitat în facilități speciale licențiate pentru acest scop.

➤ **Contaminarea pânzei de apă freatică și a apelor de suprafață în cursul operațiunilor.**

Acoperă mai multe aspecte, respectiv posibilitatea contaminării pânzei de apă freatică în timpul forajului, sau posibilitatea contaminării apelor de suprafață cu fluid de foraj, fluide tehnologice etc. Fapt este că apa freatică trebuie izolată prin coloana de suprafață cimentată în spate complet, și tubată la circa 25 de metri mai jos de pânza de apă freatică. Apoi construcția sondei mai prevede instalarea și cimentarea a una sau mai multe coloane de burlane. Forajul în pânza de apă freatică se realizează exclusiv cu fluide de foraj pe baza de apă. Ca și condiții pre-existente trebuie determinate: existența gazului biogenic care poate contamina natural apa freatică fara legătură cu operațiunile; analiza apei freatice; săparea de sonde piezometrice, determinarea nivelului piezometric și monitorizarea ulterioară a acestuia; existența gazului biogenic sau condiții de creare în ape de suprafață; fauna pre-existentă în apele de suprafață; analiza acestor ape; dinamica în timp etc.

➤ **Contaminarea pânzei de apă freatică și a apelor de suprafață în cursul fracturării hidraulice /producției presupune:**

- monitorizarea continuă a pânzei de apă freatică și a fântânilor existente prin analiză chimică, detectarea de hidrocarburi, apă

sărata, produse chimice specifice fracturării;

- monitorizarea microseismică a fracturilor în relație cu distanța până la pânza de apă freatică;

- aceeași practică se recomandă și pentru apele de suprafață;

- monitorizarea strictă trebuie aplicată și în timpul producției de hidrocarburi neconvenționale.

Este demn de remarcat faptul că un studiu aplicat pe o durată de 16 ani în Texas, investigând 16000 de sonde fracturate / refracturate nu au reliefat nicio contaminare a pânzei de apă freatică în niciun stadiu al ciclului de viață a sondei - respectiv foraj, fracturare hidraulică, producție [24]. Exxon realizează un studiu *de suprafață* referitor la acest subiect care acoperă 389000 sonde din Texas (1993-2008) și Ohio (1983-2007), documentând următoarele:

- 0 incidente cauzate / rezultate din fracturarea hidraulică și pregătirea/construcția locației de foraj;

- < 0,06% incidente rezultate din manevrarea necorespunzătoare a fluidelor la suprafață;

- < 0,05% incidente rezultate la sonde fără proprietar;

- < 0,04% incidente rezultând în timpul operațiunilor de foraj și completare [18]

➤ **Zgomot și impact vizual.**

Există și nu poate fi eliminat în totalitate, dar poate fi redus mult prin utilizarea de paravane fonoabsorbante de eficiență înaltă și prin lucrări de construcție specifice pe *pad* prin care să se reducă impactul vizual.

➤ **Seismicitate indusă.**

Este încă o problemă de actualitate. Se acuză faptul că fracturarea hidraulică induce / declanșează cutremure. Pe de altă parte, acest tip de seismicitate poate fi legat și de exploatarea zăcămintelor clasice prin injecție de apă. Fapt observat este că aceste seisme apar mai ales în zonele cu falii. Exista studii care pun în evidență câteva cazuri de seismicitate notabile: Un eveniment / cutremur atribuit fracturării hidraulice în sonde orizontale Blackpool UK în Aprilie 2011 cu magnitudinea 2,3. Presiunea s-a transmis de-a lungul planelor de stratificație intersectând o falie instabilă care s-a reactivat prin creșterea presiunii fluidului de fracturare. Un eveniment / cutremur cu magnitudinea de 3,8 petrecut în British Columbia-Canada și care a fost simțit de echipa de fracturare. În perioada 2009-2010 în același areal geografic au avut loc 38 de cutremure cu magnitudini între 2,2 și 3,8 și care au fost generate la fracturări hidraulice la sonde în zone faliat. Cu toate acestea în British Columbia au avut loc 8000 de fracturări hidraulice fără ca seismicitatea să se facă simțită [24]. Seismicitatea poate fi generată sau indusă atunci când stresul sau presiunea din pori *promovează* alunecarea în lungul unei falii. Este bine să se evite pompările de fluide cu volume mari la mare presiune, direct în / sau aproape de falii active. Totodată, este bine ca operațiunile să se bazeze pe praguri de atenție:

- **suspendă** operațiile dacă magnitudinea $\geq 4,0$;

- **procedează cu atenție** dacă magnitudinea este $[2,0; 4,0]$;

- **procedează** conform planului dacă magnitudinea $\leq 2,0$.

Notă:

$M < 2,5$: nu sunt resimțite, dar pot fi înregistrate;

$M = [2,5; 4,3]$: sunt resimțite și provoacă pagube minore sau 0;

$M > 4,3$: sunt resimțite și pot provoca pagube [18]

➤ Emisia de gaz metan

Există patru surse majore de emisie CH₄ în activitatea de explorare, producție și transport:

- emisii fugitive apar prin scurgeri de gaz la ventile, fittinguri, manifolduri, valve datorită coroziunii, uzurii sau a distrugerilor mecanice;
- purjări tehnologice în atmosferă în fazele de testare, curgere, completare a sondelor, sau la întreținerea unor echipamente; în mod normal aceste ventilări trebuie eliminate complet prin ardere controlată la faclă;
- ardori incomplete la faclă datorită condițiilor meteo, calității gazelor etc.;
- eliberări accidentale de gaze provenind din conducte, stații de compresoare, tancuri presurizate, sonde cu integritatea afectată

Teoretic, toate aceste emisii de metan pot fi controlate și reduse prin implementarea tehnologiilor de captură CO₂, prin aplicarea tehnologiilor „verzi” în completarea și fracturarea sondelor, prin aplicarea unor măsuri specifice de QHSE, printr-o practică tehnologică de calitate și prin punerea în practică a unui sistem de legi și regulamente corespunzătoare. [25]

➤ NORM - Materiale radioactive care apar natural - Naturally Occurring Radioactive Material [26]

Radiația care provine din surse geologice aduse la suprafață, radiația care este emisă de Radon și care în SUA reprezintă 35% din sursele de radiație. În cursul procesului de foraj, NORM poate fi adus la suprafață în detritusul rezultat din procesul de foraj, respectiv mici cantități de Uraniu și Thorium, de asemenea aceste elemente pot fi aduse la suprafață și prin apa de zăcămint produsă o dată cu țițeiul.

Izotopul Radon 222 (produs gazos) care rezultă din înjumătățirea elementului Radium poate fi asociat cu producția gazelor de șist. Când NORM apare la suprafață, în detritus, în apă, sau precipitat în anumite condiții, radiația pe care o emite este slabă și nu poate penetra materiale dense cum ar fi oțelul folosit la conducte, tancuri de depozitare, manifolduri, robinete, etc. Problema o reprezintă acumularea în timp de exploatare îndelungată a NORM în tancuri, conducte etc. care la anumite intervale trebuie golite, curățate și inspectate. În orice caz, publicul larg nu are contact în nici un fel cu NORM provenit din industria petrolieră, ci doar personalul operator.

2.

Stabilirea traiectoriei sondelor

2.1. Aspecte specifice privitoare la calitatea sondelor

Sonda pentru hidrocarburi (indiferent de scop - explorare, dezvoltare, indiferent de natura rezervorului țintă ș.a.) poate fi definită ca o construcție de gaură, cu diametre săpate succesiv, având pereții consolidați mecanic, fiind echipată la suprafață cu echipamente specifice așa încât să poată controla sigur orice aflus din strat, să facă posibilă investigația geologo-geofizică a succesiunilor de strate forate și care să asigure extracția la suprafață experimentală sau comercială a volumelor de hidrocarburi din ținta geologică propusă. Așadar, din punct de vedere economic, orice sondă poate fi considerată o investiție care trebuie să se amortizeze într-un număr precizabil de ani, în fiecare an aducând o rată de profit.

În ciuda incertitudinilor geologice și geofizice, din punct de vedere tehnic, sonda trebuie să fie construită din prima încercare la un nivel de calitate care să permită amortizarea ei în intervalul de tip prognozat. Calitatea găurii de sondă nu are o definiție unică, fiind un concept care înglobează multiple discipline. Din punct de vedere al forajului, acest concept poate fi asociat cu aspectele din tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Aspecte specifice privind calitatea sondelor

Forajul Direcțional	Intensitatea de deviere (DLS), tortuozitate, spiralare, traiect sondă
Integritatea găurii de sondă	Pierderi de circulație, comunicații între strate, stabilitatea pereților găurii, gaură calibrată, zonă de invazie redusă, curățarea optimă a găurii de sondă
Sonda livrată la valoarea parametrilor ceruți / proiectați	Ținta geologică / de rezervor, atinsă la termenul prevăzut Toate coloanele tubate la adâncimile proiectate Toate cimentările reușite Toate investigațiile geologice și geofizice executate cu succes Toate testele de presiune trecute cu succes Costurile realizate în bugetul (AFE) aprobat Impact minim asupra mediului și comunităților „ 0 „ Accidente

În decursul timpului, atât ingineria forajului cât și execuția sondelor a trebuit și, în continuare, trebuie să răspundă la o serie de provocări generate atât de industrie ca atare, cât și de părțile interesate în asemenea proiecte. Aceste provocări sunt determinate de:

- Legislație: definire perimetre, pasaje de siguranță și distanțe minime, drepturi de liberă trecere, protecție mediu, impact asupra comunităților, etc.
- Geografia locului: terenuri accidentate, zone inaccesibile, suprafețe de apă, zone protejate, comunități sate /orașe, natura solului, condiții hidro-meteo locale, etc.
- Condițiile geologo-geofizice: zone faliat, gaze de suprafață, ape freatice, anomalii de presiune/temperatură, domuri de sare, rezervoare subțiri, existența H₂S și CO₂ etc.
- Tehnică: reluări de gaură, sonde de salvare.
- Inginerie de rezervor: strat productiv subțire, strate productive etajate, grad și mod de deschidere a sondelor, acvifere active, permeabilitate și porozitate rezervor, gabarit de exploatare, condiții de anti coliziune, etc.

2.2.Traectorii de sonde

Una dintre cele mai importante „reacții” venite din partea ingineriei forajului pentru a răspunde cu succes acestor provocări, a fost traiectul găurii de sonda. În figura 2.1 sunt prezentate diferite traiecte de sonde.

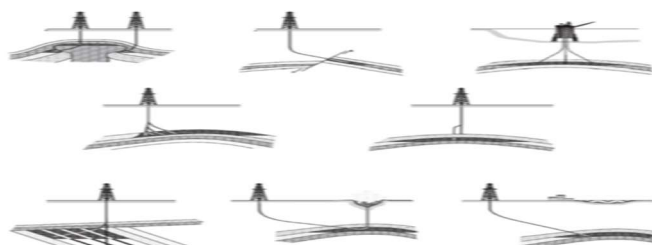


Fig. 2.1. Traiecte de sonde pentru diferite aplicații [28]

În figura 2.2 sunt prezentați parametri de măsurare pentru o sondă direcțională, respectiv adâncimea măsurată, înclinarea și azimut.

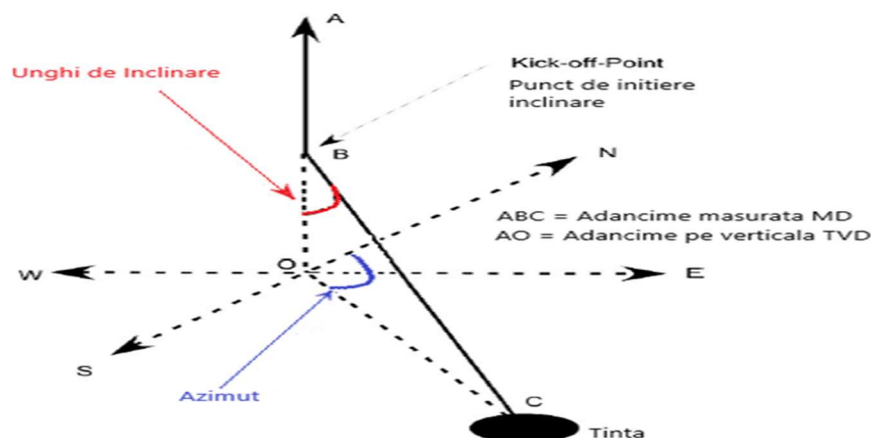


Fig. 2.2. Parametri de măsurare într-o sondă direcțională [29]

În figura 2.3 sunt prezentate câteva tipuri generice de traiecte pentru sonde direcționale.

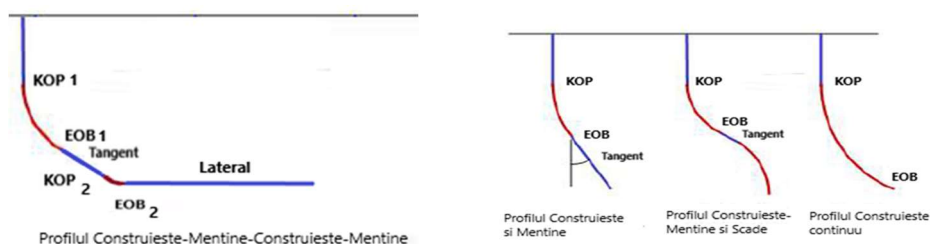


Fig. 2.3. Tipuri generice de traiecte de sonde

Din aceste traiecte generice pot rezulta în practică o multitudine de traiecte reale în două sau trei dimensiuni – deci există atât variație de înclinare cât și variație de azimut. Indiferent de complexitatea traiectoriilor, punctele caracteristice ale acestora se calculează geometric. De menționat este faptul că relațiile dintre raza de curbură sau razele de curbură (R) și deplasarea sau deplasările (D) definesc mai multe tipuri specifice de traiecte de bază. În principiu, parametrii geometrici de calcul pentru traiectorii specifice sunt calculați și tabelați în diferite publicații din industrie, care sunt extrem de accesibile (*Drilling Data Handbook*) [30]. În cele ce urmează se va face referire doar la acele traiectorii specifice sondelor cu deplasare mare respectiv sonde extinse, și sonde orizontale.

a. Raza de curbură și proiecția în plan vertical [30]

În figura 2.4 sunt reprezentate raza de curbură și proiecția în plan vertical, iar în tabelul 2.2 sunt prezentate razele de curbură pentru diferiți gradienti de creștere a înclinării

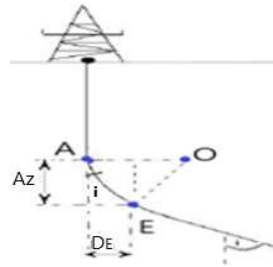


Fig. 2.4. Raza de curbură și proiecția verticală [30]

Lungimea forată de la A la E:

$$AE = L \quad (2.1)$$

Raza de curbură [m]:

$$R = \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta i} \quad (2.2)$$

Gradientul de creștere a înclinării [$^{\circ}/10$]:

$$gbu = \frac{\Delta i}{\Delta L} \quad (2.3)$$

În general $\frac{\Delta i}{\Delta L}$ este menținut cât se poate de constant în timpul inițierii înclinării (raza de curbură constantă).

$$R = \frac{573}{gbu} \quad D_E = R(1 - \cos i) \quad (m) ; \quad \Delta Z = R \sin i \quad (m) \quad (2.4)$$

Tabelul 2.2. Raze de curbură în funcție de gradientii de creștere a înclinării sondei [30]

gbu [$^{\circ}/10$ m]	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R [m]	1146	573	382	286	191	143	115	95	82	72	64	57

b. Calcularea caracteristicilor geometrice pentru un profil „J” în care $D > R$ (deplasare mai mare ca raza de curbură) [30] (fig. 2.5)

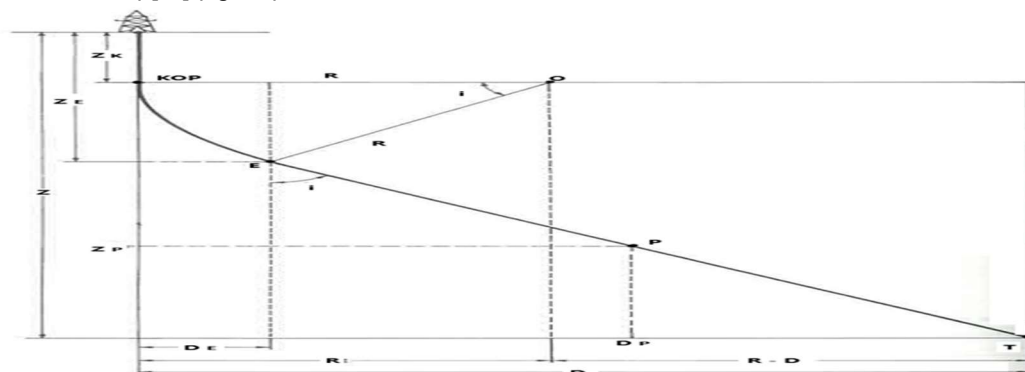


Fig. 2.5. Profil „J” în care $D > R$

Punctele caracteristice ale profilului în care $D > R$ se calculează cu ajutorul relațiilor din tabelul 2.3.

Tabelul 2.3. Punctele caracteristice ale profilului în care $D > R$ [30]

Punct de inițiere încalinare K (KOP)	Adâncime măsurată L (TMD)	Adâncime verticală Z (TVD)	Încalinare	Deplasare
	Z_K	Z_K	0	0
Final încalinare (E)	$L_E = Z_K + \frac{\pi i R}{180}$	$Z_E = Z_K + R \sin i$	i	$D_E = R (1 - \cos i)$
Țintă (T)	$L_T = Z_K + \frac{\pi i R}{180} + \frac{Z - Z_K - R \sin i}{\cos i}$	Z	i	D

Încalinarea i se calculează cu ajutorul relației

$$i = 180 - \tan^{-1} \left(\frac{Z - Z_K}{D - R} \right) - \cos^{-1} \left[\frac{R}{Z - Z_K} \sin \tan^{-1} \left(\frac{Z - Z_K}{D - R} \right) \right] \quad (2.5)$$

iar adâncimea verticală ZP la orice punct P, în funcție de lungimea de gaură forată LP, se calculează cu ajutorul relației

$$Z_P = Z_K + \frac{573}{gbu} \sin i + \left(L_P - Z_K - \frac{10 i}{gbu} \right) \cos i \quad (2.6)$$

c. Calculul caracteristicilor geometrice pentru un profil „S” vertical, în condiția $R_1 + R_2 < D$ [30] (fig. 2.6)

Caracteristicile punctelor K și E se calculează similar cu cele din tabelele 2.3 și 2.4. Asumând o revenire a sondei la verticală în punctul F, încalinarea i va depinde de adâncimea la care se găsește punctul F, și se va calcula cu ajutorul relației 2.7.

Tabelul 2.4. Puncte caracteristice pentru traiectorie „J” cu $D < R$

Punct de inițiere încalinare K (KOP)	Adâncime măsurată L (TMD)	Adâncime verticală Z (TVD)	Încalinare	Deplasare
	Z_K	Z_K	0	0
Final încalinare (E)	$L_E = Z_K + \frac{\pi i R}{180}$	$Z_E = Z_K + R \sin i$	i	$D_E = R (1 - \cos i)$
Ținta (T)	$L_T = Z_K + \frac{\pi i R}{180} + \frac{Z - Z_K - R \sin i}{\cos i}$	Z	i	D

$$i = 180 - \tan^{-1} \left(\frac{Z_F - Z_K}{D - R_1 - R_2} \right) - \cos^{-1} \left[\frac{R_1 + R_2}{Z_F - Z_K} \sin \tan^{-1} \left(\frac{Z_F - Z_K}{D - R_1 - R_2} \right) \right] \quad (2.7)$$

În figura 2.6 sunt prezentate caracteristicilor geometrice pentru un profil „S”, în condiția $R_1 + R_2 < D$ [30]

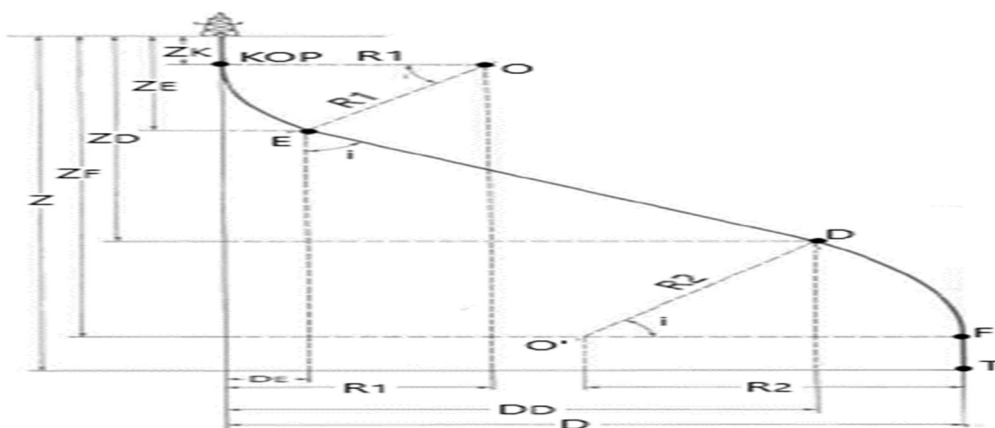


Fig 2.6. Caracteristicilor geometrice pentru un profil „S” vertical, în condiția $R_1 + R_2 < D$ [30]

2.3. Măsurarea parametrilor geometrici

În condiții de șantier sunt măsurăți trei parametri care definesc poziția oricărui punct din gaura de sondă, indiferent de profilul acesteia [31]:

- **Adâncimea măsurată (MD)**: lungimea găurii de sondă măsurată de la suprafața de la cota KB (pătrății tije) sau *Kelly Bushings*) până la punctul de măsură sau până la adâncime finală a sondei. Se măsoară în metri sau în picioare (feet).

- **Înclinarea** : unghiul dintre verticală și axa instrumentului de măsură în punctul de măsură. Se măsoară în grade. Deci un punct cu înclinare de 0 grade se consideră vertical iar cu 90 grade înclinare, se consideră orizontal.

- **Azimutul**: unghiul dintre direcția Nord care poate fi Nordul adevărat, Nordul magnetic, Nordul de grid hartă și componenta orizontală a găurii de sondă sau axa instrumentului de măsură. Azimutul se măsoară în grade în sensul acelor de ceasornic de la 0 la 360 grade sau în forme de cadranti : NE-SE-SV-NV.

Fiecare set de trei măsurători sunt luate într-un punct a găurii de sondă denumit **stație de măsură**. Uzual, între stațiile de măsură distanțele sânt de 30 m (100 feet) la sonde verticale, pe porțiuni tangente, sau 10 m (30 picioare) pentru porțiunile de gaură curbilinie (inițiere înclinare, venire la azimut, redresare la verticală etc) . Exista situații speciale în care aceste măsurători trebuie executate mai des chiar și din metru în metru.

Din aceste valori măsurate sunt apoi calculate proiecțiile fiecărui punct măsurat, respectiv :

- proiecția pe verticală (TVD), în m;
- proiecția pe axa OX (*Nothing* care este pozitivă către Nord și negativă către Sud);
- proiecția pe axa OY (*Easting* care este pozitivă către Est și negativă către V) în m;
- deplasarea / distanța punctului de măsură de la verticală (*Displacement*) în m;
- intensitatea curburii sau *Dog Leg Severity* (DLS) în grade / 30 m sau grade /100 picioare.

De remarcat este faptul că există mai multe modele matematice de calcul, unele însă venind cu erori semnificative față de realitate, așa cum se va arăta ulterior în lucrare. Toate aceste rezultate sunt grupate într-un tabel: raportul de măsurători sau *Survey Report*.

Aceste măsurători sunt necesare și obligatorii din următoarele motive:

- determinarea cu exactitate a poziției tălpiei sondei în raport cu ținta geologică sau de producție;
- determinarea cu exactitate a traiectului găurii de sondă în raport cu sondele din vecinătate;
- compararea permanentă a traiectului de sondă proiectat cu cel realizat;
- orientarea corectă a dispozitivelor de foraj direcțional;
- confirmarea formațiunilor geologice penetrate în timpul forajului;
- evaluarea intensității de deviere a sondei (DLS) care poate deveni un factor de limitare pentru anumite tehnologii;
- respectarea elementelor de legislație cu privire la drepturi minerale, distanțe de siguranță și gabarit între sonde și frontiere declarate;
- poziționarea corectă a unor drenuri laterale ulterioare sau în cazul relurărilor de gaură.

Punctele de măsură într-o gaură de sondă și parametrii de măsură sunt prezentați, schematizat, în figura 2.7.

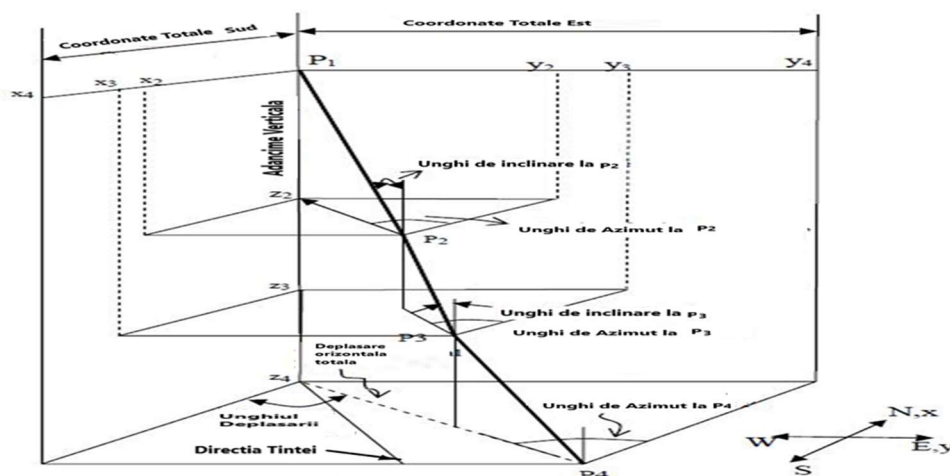


Fig. 2.7. Puncte de măsură într-o gaură de sondă și parametrii de măsură [31]

Instrumente de măsură [32]

Procesul de selectare a instrumentelor de măsură este influențat de o serie de factori precum:

- Mărimea țintei – dictează care trebuie să fie acuratețea de măsurare;
- Latitudinea geografică a sondei – cu cât latitudinea este mai mare, cu atât este mai mare efectul în instrumente magnetice și instrumente giroscopice;
- Direcția țintei – măsurătorile pe Est / Vest necesită proceduri speciale atât pentru instrumentele magnetice cât și pentru instrumentele giroscopice Nord;
- Existența sondelor multiple (platformă, *Pad*) – va accentua interferența magnetică;
- Costul operațiunilor de foraj;
- Înclinarea maximă propusă – unele instrumente au limitări privitoare la unghiul de înclinare;
- Condițiile de gaură – temperatură, diametre, vor limita folosirea anumitor instrumente;
- Adâncimea de măsurare – acuratețea unei măsurători depinde de adâncimea de măsurare;
- Gaură tubată sau gaură liberă – metalul coloanelor influențează instrumentele magnetice;
- Fluidul de foraj existent în gaura de sondă;
- Formațiunile în care se efectuează măsurătorile.

Sistemele actuale includ telemetria datelor, măsurarea electronică a parametrilor, sisteme bazate pe principii fotografice, și sisteme de măsurare continue cu citire la suprafață.

Instrumente magnetice. Din această categorie fac parte: *Magnetic Single Shot* (MSS); *Magnetic Multi Shot* (MMS); *Electronic Magnetic Multishot* (EMS). Toate aceste instrumente sunt influențate de metal (interferență magnetică). De aceea, o parte din componente se instalează în interiorul unei prăjini grele non magnetice.

Instrumente giroscopice. Se folosesc acolo unde interferența magnetică nu poate fi evitată. Există două tipuri de instrumente giroscopice: ajustabile în timp și detecția rotației Pământului sau *Gyro Rate*. Aceste instrumente au înlocuit compasul magnetic cu compasul giroscopic controlat de un motor electric de foarte mare turație. Aceste instrumente nu sunt afectate de câmpuri magnetice, interferențe magnetice, însă garnitura de foraj rămâne nemișcată în timpul măsurătorilor.

Instrumente MWD (*Measurement While Drilling*). Aceste instrumente au fost dezvoltate în anii 1970 de firma Teleco, și puse pe piață în anii 1980. Aceste sisteme pot fi combinate cu alte instrumente pentru determinarea presiunilor, rezistivităților, potențialului spontan, Gama Natural, așa încât sistemele MWD, LWD, PWD au devenit componente de bază pentru tehnologia forajului orizontal. Telemetria datelor deci se face fie hidraulic, fie prin unde radio.

a. Modele de calcul pentru parametrii traiectului sondei

Conform API D20, *Bulletin on Directional Drilling Survey Calculation Methods and Terminology*, 1985, API: Washington, DC. [33] Erorile semnalate între cele 5 modele de calcul sunt prezentate în tabelul 2.5

Tabelul 2.5. Compararea rezultatelor a cinci algoritmi de calcul pentru parametrii traiectului de sondă [33]

Algoritm de calcul	Eroare in TVD [ft] [m]		Eroare in Deplasare [ft] [m]	
Metoda Tangentei	- 4,76	1,45	+ 14,99	4,56
Metoda Tangentei Balansate	- 0,11	0,033	- 0,03	0,00914
Metoda Unghiului Mediu	- 0,00	0,00	- 0,25	0,0762
Metoda Razei de Curbură	- 0,04	0,012	- 0,31	0,0944
Metoda Curburii Minime	0		0	

Specificații sondă: Sonda testată de *Sperry Sun*. adâncimea maximă = 6023 ft (1835,8 m) ; înclinare maximă 26°; interval de măsură 62 ft (18,89 m); sondă verticală 0- 4064 ft (1238,7 m) ; apoi crește înclinarea la 26° la adâncimea de 6023 ft (1835 m).

Metoda curburii minime [34]

Ca urmare a erorilor minime și a posibilității relativ simple de a programa algoritmul matematic, această metodă a devenit cea mai comună în calcularea traiectelor de sonde. În figura 2.8 este prezentată geometria care stă la baza modelului de calcul prin metoda curburii minime.

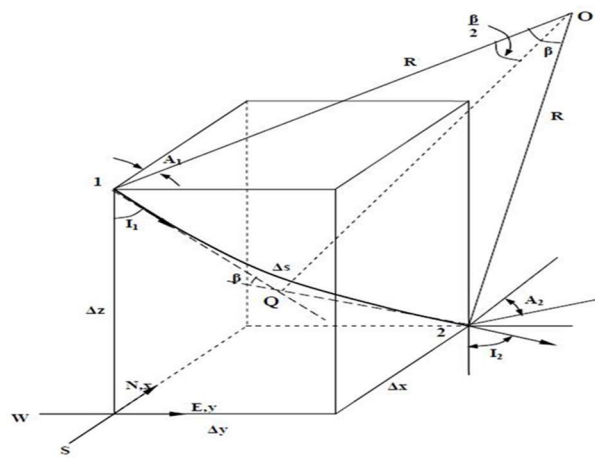


Fig. 2.8. Geometria modelului de calcul prin metoda curburii minime - Taylor& Mason 1971 [34]

Formularea analitică a metodei curburii minime a fost propusă inițial de Taylor și Mason în 1971. În această metodă se face ipoteza că două puncte succesive de măsurare pe traiectoria sondei se găsesc pe un arc de cerc care se găsește într-un plan așa cum este reprezentat în figura 2.8. Liniile de calcul și succesiunea matematică pentru acest model au fost sintetizate în următoarele ecuații [33]. Cu alte cuvinte, punctele 1, 2 și punctul O se găsesc pe același plan, iar curbura segmentului dintre punct 1 și punct 2 este constantă. Adâncimea măsurată între punctul 1 și punctul 2 este notată cu Δs , iar raza arcului de cerc care leagă cele două puncte este R . Unghiul β se numește *Dog Leg* (intensitatea curburii).

I_1 și I_2 sunt înclinările găurii de sondă pentru punctele 1 și 2 iar A_1 și A_2 azimuturile punctelor.

Metoda folosește un factor de corecție între linia dreaptă și linia curbă dintre punctele 1 și 2, definit ca

$$F = \frac{\Delta s}{\beta} \cdot \tan \frac{\beta}{2} \quad (2.13)$$

în care *Dog Leg* β se calculează cu relația Lubinsky:

$$\beta = 2 \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{I_2 - I_1}{2} \right) + \sin I_1 \sin I_2 \sin^2 \left(\frac{A_2 - A_1}{2} \right)} \quad (2.14)$$

Pentru valori mici ale lui β ,

$$F = \frac{\Delta s}{2} \quad (2.15)$$

Proiecțiile pe axa Nord-Sud (axa ox):

$$\Delta x = (\sin I_1 \cos A_1 + \sin I_2 \cos A_2) F \quad (2.16)$$

Proiecțiile pe axa Est – Vest (axa oy):

$$\Delta y = (\sin I_1 \sin A_1 + \sin I_2 \sin A_2) F \quad (2.17)$$

Proiecțiile pe verticală (axa oz)

$$\Delta z = (\cos I_1 + \cos I_2) F \quad (2.18)$$

Calculul traiectoriei găurii de sondă este deosebit de important, constituind primul pas pentru modelarea forțelor laterale în garnitura de foraj, calculul valorilor momentelor de torsiune și sarcini axiale, calculul uzurii colanelor de burlane etc. Lucrarea urmează să prezinte realizarea unei foi de calcul în Excel, introducerea unor parametri de la o sondă reală, și validarea calculelor prin comparația rezultatelor obținute prin utilizarea unui *software* comercial, practicat pe scară largă în industrie. Inițierea foi de calcul se face prin tabelarea termenilor ca în tabelul 2.6.

Tabelul 2.6. Tabelarea termenilor din foaie de calcul

LITERA DIN FOAIE	VALOAREA OBTINUTĂ	SURSA SAU ECUAȚIA
MD	Adâncimea măsurată: Lungimea găurii de sondă de la suprafață la orice punct de măsură	Măsurători în gaura de sondă
I	Unghiul de înclinare al găurii de sondă	Măsurători în gaura de sondă
C	Direcția găurii de sondă – Direcția cursului	Măsurători în gaura de sondă
D	Distanța între stațiile de măsurare	$AX - A(X-1)$
E	Înclinarea medie	$(\alpha x + \alpha x-1)/2$
d	Proiecția pe verticală a distanței între 2 măsurători succesive	$D \cos(E)$
G	Adâncimea pe verticală (TVD)	$\sum d$

H	Proiecția pe orizontală a distanței între 2 măsurători succesive	D sin(E)
A°	Valoarea azimutului în punctele de măsură 0-360° Nord la 0°, în sensul acelor de ceasornic.	Măsuratori în gaura de sondă Ai°
K	Azimut mediu între doua puncte succesive	$(\epsilon x + \epsilon(x-1))/2$
L	Componenta deplasării orizontale a unui punct de măsură pe direcția Nord (+) Sud (-)	H cos(K)
M	Componenta deplasării orizontale a unui punct de măsură pe direcția Est (+) Vest (-)	H sin(K)
N	Total deplasare componentă Nord Sud	$\sum L$
O	Total deplasare componentă Est - Vest	$\sum M$
P	Deplasare totală – distanța dintre orice punct de măsură și verticală	$\sqrt{N^2 + O^2}$
Q	Direcția Deplasării: Direcția proiecției verticale pe un plan orizontal de la gura sondei la stația de măsură. Se ia valoarea calculată și se reprezintă în cuadrantul respectiv	arctan (O/N)

Scrierea unui program de calcul în Excel care să calculeze punctele unui traiect de sondă prin metoda Curburii minime constă în următorii pași:

Pasul 1: Formatarea paginii meniu (tabelul 2.7):

Se vor preciza: date generale de identificare proiect cum ar fi : client, sondă, dată, coordonatele de la gura sondei, adâncimea verticală pentru *Kick Of Point* (inițierea devierii), coordonatele țintei, adâncimea verticală (TVD m) a țintei, toleranța de atingere a țintei (în metri), azimutul țintei (în grade), alte date de identificare necesare. De asemenea, în această pagină vor fi introduse datele din măsurătorile de deviație efectuate efectiv la sondă, respectiv:

- adâncimile măsurate de la suprafață la fiecare punct de măsură în metri MD(i) i = 1,n – coloana C de la 14 la n;
- înclinările I(i) i = 1,n pentru fiecare punct măsurat în grade – Coloana D de la 14 la n;
- azimuturile A(i) i = 1,n pentru fiecare punct măsurat în grade – Coloana E de la 14 la n.

Convențional, câmpurile datelor de intrare sunt marcate cu verde, iar datele calculate vor fi afișate în câmpuri marcate cu nuanța roșie.

Foaia de calcul poate fi structurată în doua module care execută aceleași calcule, respectiv: modulul Sonda proiectată și modulul Sonda realizată sau Sonda simulată, în acest fel putând compara rapid și efectiv două seturi de data de interes.

Tabelul 2.7. Formatarea paginii Meniu

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
3		Client										
4		Sonda	WB1A									
5		Coordonate										
6		Cap de erupție	XXX XXX XXX	Nord	XXX XXX XXX	Est	m					
7		KOP		TVD m								
8		Ținta	XXX XXX X	Nord	XXX XXX XXX	Est	m		TVD m			
9		Azimut Ținta										
10		Calcul puncte traiect sonda										
11		Date de Intrare INPUT METODA Calcul - Curbura Minima										
12	#	MD	Inclinare	Azimut	TVD	Nord	Total Nord	Est	Total Est	Deplasare	S Verticală	OLS
13	0	m	grd.	grd.	Z (m)	ΔY (m)	Y (m)	ΔX (m)	X (m)	ΔS (m)	(m)	grd./30 m
14	1											
15	2											
16	3											
17	4											
18	n											

Tot în pagina de intrare (Meniu) sunt afișate și rezultatele finale, calculate și preluate din „ Foaia de Calcul”, după cum urmează:

- TVD sau Z (i) i=1,n în metri – Adâncimile verticale (proiecțiile pe axa OZ ale fiecarui punct i măsurat.
- Nord sau ΔY (i) i=1,n în metri – Proiecțiile componentei orizontale pe axa OY (Nord-Sud) pentru fiecare punct i măsurat. Prin convenție, valori Nord sant „+ „ iar cele Sud sant „ – „
- Total Nord sau $Y = \sum_{i=1}^n \Delta Y (i)$ în metri
- Est sau ΔX (i) i=1,n în metri - Proiecțiile componentei orizontale pe axa OX (Est-Vest) pentru fiecare punct i măsurat. Prin convenție, valori Est sant „+ „ iar cele Vest sant „ – „
- Total Est sau $X = \sum_{i=1}^n \Delta X (i)$ în metri.
- Deplasarea Totala în metri ΔS
- Secțiunea Verticală S. Vert. în metri

- Dog Leg - Intensitatea devierii în grade / 30 m.

Pasul 2. Formatarea paginilor de calcul (tabelul 2.8)

Pentru rezolvarea numerică a ecuațiilor 2.14 la 2.18, este necesară efectuarea unor calcule colaterale așa încât să rezulte niște termeni intermediari, ce vor fi folosiți ulterior pentru optimizare calculelor astfel ca ecuațiile de mai sus să devină mai ușor de folosit.

a. Din Pagina „Meniu” – tabelul 2.7 se importă valorile în formatarea paginii de calcul (prezentată în tabelul 2.8) pentru MD, înclinarea I și azimutul A. Se calculează succesiv: $\sin(I_i = 1, n)$; $\cos(I_i = 1, n)$; $\sin(A_i = 1, n)$; $\cos(A_i = 1, n)$. Pentru utilizarea funcțiilor trigonometrice, unghiurile sunt transformate din grade în radiani.

Tabelul 2.8. Formatarea paginii de calcul

	B	C	D	E	F	G	H
	MD	Inclinare	Azimut	sin (I)	cos (I)	sin (A)	cos (A)
	m	I °.	A °.				
6	=Foaie Meniu 'IB14	=Foaie Meniu 'IC14	=Foaie Meniu 'ID14	=SIN(C7*PI()/180)	=COS(C7*PI()/180)	=SIN(D7*PI()/180)	=COS(D7*PI()/180)
7	=Foaie Meniu 'IB15	=Foaie Meniu 'IC15	=Foaie Meniu 'ID15	=SIN(C8*PI()/180)	=COS(C8*PI()/180)	=SIN(D7*PI()/180)	=COS(D7*PI()/180)
8	=Foaie Meniu 'IB16	=Foaie Meniu 'IC16	=Foaie Meniu 'ID16	=SIN(C*PI()/180)	=COS(C9*PI()/180)	=SIN(D8*PI()/180)	=COS(D8*PI()/180)
i	=Foaie Meniu 'IBi	=Foaie Meniu 'ICi	=Foaie Meniu 'IDi	=SIN(Ci*PI()/180)	=COS(Ci*PI()/180)	=SIN(Di*PI()/180)	=COS(Di*PI()/180)
10	=Foaie Meniu 'IBn	=Foaie Meniu 'ICn	=Foaie Meniu 'IDn	=SIN(Cn*PI()/180)	=COS(Cn*PI()/180)	=SIN(Dn*PI90/180)	=COS(Dn*PI()/180)

b. Se continuă prin calcularea succesivă a termenilor (tabelul 2.9).

$MD_i/2 \quad i = 1, n$

$\cos(I_i - I_{i-1}) \quad i = 1, n$

$\cos(A_i - A_{i-1}) \quad i = 1, n$

$\sin(I_{i-1}) * \sin(I_i) \quad i = 1, n$

$\cos(I_{i-1}) * \cos(I_i) \quad i = 1, n$

Tabelul 2.9. Formatarea paginii de calcul - continuare

	I	J	K	L	M
	MD/2	Cos (I2 - I1)	Cos (A2 - A1)	Sin (I1) x sin (I2)	cos I1 x cos I2
	m				
6	=(B8-B7)/2	=COS(((C8-C7)*PI()/180))	=COS(((D8-D7)*PI()/180))	=E7*E8	=F7*F8
7	=(B9-B8)/2	=COS(((C10-C9)*PI()/180))	=COS(((D9-D8)*PI()/180))	=E8*E9	=F8*F9
8	=(B10-B9)/2	=COS(((C11-C10)*PI()/180))	=COS(((D10-D9)*PI()/180))	=E9*E10	=F9*F10
i	i	i	i	i	i
10	=(Bn - Bn-1)/2	=COS(((Cn-Cn-1)*PI()/180))	=COS(((Dn-Dn-1)*PI/180))	=En-1* En	=Fn-1* Fn

Apoi se calculează :

$$\bullet \text{ Dog leg } \beta = 2 \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{I_2 - I_1}{2} \right) + \sin I_1 \sin I_2 \sin^2 \left(\frac{A_2 - A_1}{2} \right)} \quad [\text{rad}] \quad (2.19) \text{ (Relația Lubinsky)}$$

sau

$$\beta = \cos^{-1} [\cos(I_2 - I_1) - (\sin(I_1) \times \sin(I_2) \times (1 - \cos(A_2 - A_1)))] \quad [\text{rad}] \quad (2.20)$$

în care:

I_1 și I_2 sunt valorile unghiurilor de înclinare ale găurii de sondă pentru două puncte succesive de măsurare;

A_1 și A_2 - valorile unghiurilor de azimut ale găurii de sondă pentru două puncte succesive de măsurare.

Apoi:

- Se transformă Dog Leg-ul β din radiani în grade;
- Se calculează DLS - severitatea Dog Leg-ului în grade/ 30 m;
- Se calculează $\tan(\beta/2)$, cu care se va calcula factorul de corecție

$$F = \frac{\Delta s}{\beta} \cdot \tan \frac{\beta}{2} \quad (2.21)$$

Tabelul 2.10. Formatarea paginii de calcul și liniile de calcul - continuare

	N	O	P	Q	R
	β	β (DL)	DLS	T_g (DL/2)	RF
	rad	Grd.	Grd/30 m		
6	=ACOS((E7*E8*K8)+(F7*F8))	=N8*180/PI()	=O8*30/(B8-B7)	=TAN(N8/2)	=IF(N8=0;1;(2/N8)*Q8)
7	=ACOS((E8*E9*K9)+(F8*F9))	=N9*180/PI()	=O9*30/(B9-B8)	=TAN(N9/2)	=IF(N9=0;1;(2/N9)*Q9)
8	=ACOS((E9*E10*K10)+(F9*F10))	=N10*180/PI()	=O10*30/(B10-B9)	=TAN(N10/2)	=IF(N10=0;1;(2/N10)*Q10)
i	i	i	i	i	i
10	=ACOS((En-1*En*Kn)+(Fn-1*Fn))	=Nn*180/PI()	=On*30/(Bn-Bn-1)	=TAN(Nn/2)	=IF(Nn=0;1;(2/Nn)*Qn)

Cu termenii intermediari calculați la punctele **a**; **b** se trece la calcularea efectivă a parametrilor ce caracterizează punctele în care s-au efectuat măsurătorile de deviație, respectiv:

Zi – Proiecția pe verticală (axa OZ) a fiecărui punct măsurat în gaura de sondă (în metri);

TVD – Suma proiecțiilor verticale a fiecărui punct măsurat în gaura de sondă de la cota 0 m la adâncimea măsurată (MD) curentă (în metri);

ΔY - Proiecția componentei orizontale a fiecărui punct măsurat în gaura de sondă, pe axa OY respectiv direcția Nord – Sud. Prin convenție, valorile pozitive sunt către direcția Nord, cele negative către direcția Sud;

NORD - Suma proiecțiilor orizontale pe axa OY a fiecărui punct măsurat în gaura de sondă de la cota 0 m până la adâncimea măsurată (MD) curentă (în metri);

ΔX - Proiecția componentei orizontale a fiecărui punct măsurat în gaura de sondă, pe axa OX respectiv direcția Est – Vest. Prin convenție, valorile pozitive sunt către direcția Est, cele negative către direcția Vest;

EST - Suma proiecțiilor orizontale pe axa OX a fiecărui punct măsurat în gaura de sondă de la cota 0 m până la adâncimea măsurată (MD) curentă (în metri).

Tabelul 2.11. Formatarea paginii de calcul și liniile de calcul - continuare

	S	T	U	V	W	X
	Zi	TVD	ΔX	Est	ΔY	Nord
i	m	m	m	m	m	m
6	=I8*(F7+F8)*R8	=S8	=I8*((E7*G7)+(E8*G8))*R8	=U8	=I8*((E7*H7)+(E8*H8))*R8	=W8
7	=I9*(F8+F9)*R9	=T8+S9	=I9*((E8*G8)+(E9*G9))*R9	=U9+V8	=I9*((E8*H8)+(E9*H9))*R9	=W9+X8
8	=I10*(F9+F10)*R10	=T9+S10	=I10*((E9*G9)+(E10*G10))*R10	=U10+V9	=I10*((E9*H9)+(E10*H10))*R10	=W10+X9
9	i	i	i	i	i	i
10	=In*(Fn-1+Fn)*Rn	=Tn-1+S1n	=In*((En-1*Gn-1)+(En*Gn))*Rn	=Un+Vn-1	=In*((En-1*Hn-1)+(En*Hn))*Rn	=Wn+Xn-1

Deplasarea (Totală) - Deplasare totală – distanța dintre orice punct de măsură și verticală (în metri).

Direcția Deplasării - Direcția proiecției verticale pe un plan orizontal de la gura sondei la stația de măsură. Se ia valoarea calculată și se reprezintă în cuadrantul respectiv (în grade) (tabelul 2.12).

Tabelul 2.12. Formatarea paginii de calcul și liniile de calcul - continuare

	Y	Z	AA	AC
	Deplasare	Azimut	Diferența Direcțională	Secțiune Verticală
i	m	Deplasare *	Grade	m
6	=((V8)^2+(X8)^2)^0,5	=360+((ATAN(V8/X8))*57,32)	=V1-Z8	=Y8*COS(AA8*PI()/180)
7	=((V9)^2+(X9)^2)^0,5	=360+((ATAN(V9/X9))*57,32)	=V1-Z9	=Y9*COS(AA9*PI()/180)
8	=((V10)^2+(X10)^2)^0,5	=360+((ATAN(V10/X10))*57,32)	=V1-Z10	=Y10*COS(AA10*PI()/180)
9	i	i	i	i
10	=((Vn)^2+(Xn)^2)^0,5	=360+((ATAN(Vn/Xn))*57,32)	=V1-Zn	=Yn*COS(AAn*(PI()/180)

În final, foaia de calcul arată ca în tabelul 2.13, iar foaia Meniu ca în tabelul 2.14.

Tabelul 2.13. Foaia de calcul

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AC
MD	Inclinare	Azimut	Sin (I)	Cos (I)	Sin (A)	Cos (A)	MD/2	Cos (I2-I1)	Cos (A2-A1)	Sin (I1) x sin (I2)	cos I1 x cos I2	β	β (DJ)	DLS	T_g (DJ/2)	RF	Zi	TVD	ΔX	EST	ΔY	Nord	Deplasare	Azimut	Diferență	Sectiune V
m	grd.	grd.					m					rad	grd	Grd/30 m			m	m	m	m	m	m	m	Deplasare*	Directionale	m
0	0	0																								
0,0	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000																				
360,0	0,001	324,392	0,000	1,000	-0,582	0,813	180,0	1,000	0,813	0,000	1,000	0,000	0,001	0,000	0,000	1,000	360,0	360,0	0,00	0,00	0	0,00	0	324	0,0	0
400,0	0,000	324,392	0,000	1,000	-0,582	0,813	20,0	1,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,001	0,001	0,000	1,000	40,0	400,0	0,00	0,00	0	0,00	0	324	0,0	0
420,0	2,000	324,392	0,035	0,999	-0,582	0,813	10,0	0,999	1,000	0,000	0,999	0,035	2,000	3,000	0,017	1,000	20,0	420,0	-0,20	-0,21	0	0,29	0	324	0,0	0
450,0	5,000	324,392	0,087	0,996	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,003	0,996	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	29,9	449,9	-1,07	-1,27	1	1,78	2	324	0,0	2
480,0	8,000	324,392	0,139	0,990	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,012	0,986	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	29,8	479,7	-1,98	-3,25	3	4,54	6	324	0,0	6
510,0	11,000	324,392	0,191	0,982	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,027	0,972	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	29,6	509,3	-2,88	-6,13	4	8,56	11	324	0,0	11
540,0	14,000	324,392	0,242	0,970	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,046	0,952	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	29,3	538,6	-3,78	-9,91	5	13,84	17	324	0,0	17
570,0	17,000	324,392	0,292	0,956	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,071	0,928	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	28,9	567,5	-4,67	-14,58	7	20,36	25	324	0,0	25
600,0	20,000	324,392	0,342	0,940	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,100	0,899	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	28,4	596,0	-5,54	-20,12	8	28,10	35	324	0,0	35
630,0	23,000	324,392	0,391	0,921	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,134	0,865	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	27,9	623,9	-6,40	-26,52	9	37,03	46	324	0,0	46
660	26,000	324,392	0,438	0,899	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,171	0,827	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	27,3	651,2	-7,24	-33,76	10	47,15	58	324	0,0	58
690	29,000	324,392	0,485	0,875	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,213	0,786	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	26,6	677,8	-8,06	-41,83	11	58,41	72	324	0,0	72
720	32,000	324,392	0,530	0,848	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,257	0,742	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	25,8	703,6	-8,86	-50,69	12	70,79	87	324	0,0	87
750	35,000	324,392	0,574	0,819	-0,582	0,813	15,0	0,999	1,000	0,304	0,695	0,052	3,000	3,000	0,026	1,000	25,0	728,6	-9,64	-60,33	13	84,25	104	324	0,0	104
763	36,321	324,392	0,592	0,806	-0,582	0,813	6,6	1,000	1,000	0,340	0,660	0,023	1,321	3,000	0,012	1,000	10,7	739,4	-4,48	-65	6	91	111	324	0,0	111
1707	36,321	324,392	0,592	0,806	-0,582	0,813	472,0	1,000	1,000	0,351	0,649	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	760,6	1500,0	-325,57	-390	455	545	670	324	0,0	670
2030	36,321	324,392	0,592	0,806	-0,582	0,813	161,3	1,000	1,000	0,351	0,649	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	260,0	1760,0	-111,28	-502	155	701	862	324	0,0	862
2040	36,086	324,392	0,589	0,808	-0,582	0,813	5,0	1,000	1,000	0,349	0,651	0,004	0,235	0,700	0,002	1,000	8,1	1768,1	-3,46	-505	5	705	868	324	0,0	868
2070	35,386	324,392	0,579	0,815	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,341	0,659	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	24,4	1792,5	-10,20	-515	14	720	885	324	0,0	885
2100	34,686	324,392	0,569	0,822	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,330	0,670	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	24,6	1817,0	-10,03	-525	14	734	902	324	0,0	902
2130	33,986	324,392	0,559	0,829	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,318	0,682	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	24,8	1841,8	-9,85	-535	14	747	919	324	0,0	919
2160	33,286	324,392	0,549	0,836	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,307	0,693	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	25,0	1866,8	-9,68	-545	14	761	936	324	0,0	936
2190	32,586	324,392	0,539	0,843	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,296	0,704	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	25,2	1892,0	-9,50	-554	13	774	952	324	0,0	952
2220	31,886	324,392	0,528	0,849	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,284	0,715	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	25,4	1917,3	-9,32	-564	13	787	968	324	0,0	968
2250	31,186	324,392	0,518	0,855	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,274	0,726	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	25,6	1942,9	-9,14	-573	13	800	984	324	0,0	984
2280	30,486	324,392	0,507	0,862	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,263	0,737	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	25,8	1968,7	-8,95	-582	13	812	999	324	0,0	999
2310	29,786	324,392	0,497	0,868	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,252	0,748	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	25,9	1994,6	-8,77	-591	12	825	1014	324	0,0	1014
2340	29,086	324,392	0,486	0,874	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,241	0,758	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	26,1	2020,7	-8,58	-599	12	837	1029	324	0,0	1029
2370	28,386	324,392	0,475	0,880	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,231	0,769	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	26,3	2047,0	-8,40	-608	12	848	1043	324	0,0	1043
2400	27,686	324,392	0,465	0,886	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,221	0,779	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	26,5	2073,5	-8,21	-616	11	860	1058	324	0,0	1058
2430	26,986	324,392	0,454	0,891	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,211	0,789	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	26,6	2100,2	-8,02	-624	11	871	1071	324	0,0	1071
2460	26,286	324,392	0,443	0,897	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,201	0,799	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	26,8	2127,0	-7,83	-632	11	882	1085	324	0,0	1085
2490	25,586	324,392	0,432	0,902	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,191	0,809	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	27,0	2154,0	-7,64	-639	11	893	1098	324	0,0	1098
2520	24,886	324,392	0,421	0,907	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,182	0,818	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	27,1	2181,1	-7,45	-647	10	903	1111	324	0,0	1111
2550	24,186	324,392	0,410	0,912	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,172	0,828	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	27,3	2208,4	-7,25	-654	10	913	1123	324	0,0	1123
2580	23,486	324,392	0,399	0,917	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,163	0,837	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	27,4	2235,8	-7,06	-661	10	923	1135	324	0,0	1135
2610	22,786	324,392	0,387	0,922	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,154	0,846	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	27,6	2263,4	-6,86	-668	10	933	1147	324	0,0	1147
2640	22,086	324,392	0,376	0,927	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,146	0,854	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	27,7	2291,1	-6,67	-675	9	942	1158	324	0,0	1158
2670	21,386	324,392	0,365	0,931	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,137	0,863	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	27,9	2319,0	-6,47	-681	9	951	1170	324	0,0	1170
2700	20,686	324,392	0,353	0,936	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,129	0,871	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	28,0	2347,0	-6,27	-687	9	960	1180	324	0,0	1180
2730	19,986	324,392	0,342	0,940	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,121	0,879	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	28,1	2375,1	-6,07	-693	8	968	1191	324	0,0	1191
2790	18,586	324,392	0,319	0,948	-0,582	0,813	30,0	1,000	1,000	0,109	0,891	0,024	1,400	0,700	0,012	1,000	56,6	2431,8	-11,54	-705	16	984	1211	324	0,0	1211
2820	17,886	324,392	0,307	0,952	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,098	0,902	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	28,5	2460,3	-5,47	-710	8	992	1220	324	0,0	1220
2850	17,186	324,392	0,295	0,955	-0,582	0,813	15,0	1,000	1,000	0,091	0,909	0,012	0,700	0,700	0,006	1,000	2									

Tabelul 2.14. Foaia Meniu

Client Sonda: WP1A VALIDARE FOAIE DE CALCUL Coordonate Cap de eruptie XXX XXX XXX XXX XXX XXX Est KOP XXX X Nord XXX XXX XXX Est Tinta XXX X Nord XXX XXX XXX Est Azimut Tinta 324,4° CALCUL TRAIECT SONDA METODA Calcul - Curbura Minima Date de Intrare INPUT										
PROIECTAT				(Date calculate)						
#	MD	Inclin.	Azim.	TVD	+N / -S	E / -W	V Sec	DL5	Deplasare	Azimut
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	m	m	a/30 m	ΔS (m)	Deplasare Δ
1	0	0	0	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0,00
2	360,00	0,00	324,39	360,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	324,38
3	400,00	0,00	324,39	400,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	324,38
4	420,00	2,00	324,39	420,00	0,29	0	0,00	3,00	0,35	324,38
5	450,00	5,00	324,39	449,94	1,78	-1	2,18	3,00	2,18	324,38
6	480,00	8,00	324,39	479,74	4,54	-3	5,58	3,00	5,58	324,38
7	510,00	11,00	324,39	509,33	8,56	-6	10,53	3,00	10,53	324,38
8	540,00	14,00	324,39	538,61	13,84	-10	17,02	3,00	17,02	324,38
9	570,00	17,00	324,39	567,52	20,36	-15	25,04	3,00	25,04	324,38
10	600,00	20,00	324,39	595,96	28,10	-20	34,56	3,00	34,56	324,38
11	630,00	23,00	324,39	623,87	37,03	-27	45,55	3,00	45,55	324,38
12	660,00	26,00	324,39	651,17	47,15	-34	57,99	3,00	57,99	324,38
13	690,00	29,00	324,39	677,78	58,41	-42	71,84	3,00	71,84	324,38
14	720,00	32,00	324,39	703,62	70,79	-51	87,07	3,00	87,07	324,38
15	750,00	35,00	324,39	728,64	84,25	-60	103,62	3,00	103,62	324,38
16	763,21	36,32	324,39	739,36	90,51	-65	111,32	3,00	111,32	324,38
17	1707,26	36,32	324,39	1500,00	545,12	-390	670,48	0,00	670,48	324,38
18	2029,93	36,32	324,39	1759,98	700,50	-502	861,60	0,00	861,60	324,38
19	2040,00	36,09	324,39	1768,11	705,34	-505	867,55	0,70	867,55	324,38
20	2070,00	35,39	324,39	1792,46	719,58	-515	885,07	0,70	885,07	324,38
21	2100,00	34,69	324,39	1817,02	733,58	-525	902,30	0,70	902,30	324,38
22	2130,00	33,99	324,39	1841,80	747,34	-535	919,22	0,70	919,22	324,38
23	2160,00	33,29	324,39	1866,77	760,85	-545	935,83	0,70	935,84	324,38
24	2190,00	32,59	324,39	1891,95	774,11	-554	952,15	0,70	952,15	324,38
25	2220,00	31,89	324,39	1917,33	787,12	-564	968,15	0,70	968,15	324,38
26	2250,00	31,19	324,39	1942,90	799,88	-573	983,84	0,70	983,84	324,38
27	2280,00	30,49	324,39	1968,66	812,38	-582	999,22	0,70	999,22	324,38
28	2310,00	29,79	324,39	1994,60	824,63	-591	1014,28	0,70	1014,28	324,38
29	2340,00	29,09	324,39	2020,73	836,61	-599	1029,02	0,70	1029,02	324,38
30	2370,00	28,39	324,39	2047,03	848,34	-608	1043,44	0,70	1043,44	324,38
31	2400,00	27,69	324,39	2073,51	859,80	-616	1057,54	0,70	1057,54	324,38
32	2430,00	26,99	324,39	2100,16	871,00	-624	1071,32	0,70	1071,32	324,38
33	2460,00	26,29	324,39	2126,98	881,94	-632	1084,77	0,70	1084,77	324,38
34	2490,00	25,59	324,39	2153,96	892,61	-639	1097,89	0,70	1097,89	324,38
35	2520,00	24,89	324,39	2181,09	903,00	-647	1110,68	0,70	1110,68	324,38
36	2550,00	24,19	324,39	2208,38	913,13	-654	1123,14	0,70	1123,14	324,38
37	2580,00	23,49	324,39	2235,83	922,99	-661	1135,26	0,70	1135,26	324,38
38	2610,00	22,79	324,39	2263,41	932,57	-668	1147,05	0,70	1147,05	324,38
39	2640,00	22,09	324,39	2291,14	941,88	-675	1158,50	0,70	1158,50	324,38
40	2670,00	21,39	324,39	2319,01	950,91	-681	1169,61	0,70	1169,61	324,38
41	2700,00	20,69	324,39	2347,01	959,67	-687	1180,38	0,70	1180,38	324,38
42	2730,00	19,99	324,39	2375,14	968,14	-693	1190,80	0,70	1190,80	324,38
43	2760,00	19,29	324,39	2403,37	976,34	-700	1200,96	0,70	1200,96	324,38
44	2790,00	18,59	324,39	2431,77	984,26	-705	1210,62	0,70	1210,62	324,38
45	2820,00	17,89	324,39	2460,26	991,89	-710	1220,00	0,70	1220,00	324,38
46	2850,00	17,19	324,39	2488,87	999,24	-716	1229,04	0,70	1229,04	324,38
47	2880,00	16,49	324,39	2517,58	1006,30	-721	1237,73	0,70	1237,73	324,38
48	2910,00	15,79	324,39	2546,40	1013,08	-726	1246,07	0,70	1246,07	324,38
49	2940,00	15,09	324,39	2575,32	1019,57	-730	1254,05	0,70	1254,05	324,38
50	2970,00	14,39	324,39	2604,33	1025,77	-735	1261,68	0,70	1261,69	324,38
51	3000,00	13,69	324,39	2633,44	1031,69	-739	1268,96	0,70	1268,96	324,38
52	3030,00	12,99	324,39	2662,63	1037,32	-743	1275,88	0,70	1275,88	324,38
53	3060,00	12,29	324,39	2691,90	1042,65	-747	1282,44	0,70	1282,44	324,38
54	3090,00	11,59	324,39	2721,25	1047,70	-750	1288,65	0,70	1288,65	324,38
55	3120,00	10,89	324,39	2750,68	1052,45	-754	1294,49	0,70	1294,49	324,38
56	3150,00	10,19	324,39	2780,17	1056,91	-757	1299,98	0,70	1299,98	324,38
57	3157,95	10,00	324,39	2788,00	1058,04	-758	1301,37	0,70	1301,37	324,38
58	3259,49	10,00	324,39	2888,00	1072,38	-768	1319,00	0,00	1319,00	324,38
59	3261,83	10,00	324,39	2910,00	1075,53	-770	1322,88	0,00	1322,88	324,38
60	3319,40	10,00	324,39	2947,00	1080,83	-774	1329,41	0,00	1329,41	324,38
61	3324,48	10,00	324,39	2952,00	1081,55	-775	1330,29	0,00	1330,29	324,38

Validarea foi de calcul din EXCEL

Calculul traiectului sondei stă la baza modelelor matematice care definesc cel puțin:

- dinamica forțelor laterale în materialul tubular din gaura de sondă;
- valorile momentelor de torsiune și încărcările la tracțiune în materialul tubular din gaura de sondă;
- transmiterea impulsului în materialul tubular în cazul folosirii dispozitivelor de impact (geale si acceleratori);
- distribuția uzurii prin frecare a materialului tubular din gaura de sondă.

De asemenea, pe baza modelul curburii minime și a ecuației Lubynsky pentru determinarea *Dog Leg Severity*, Foia de calcul a fost împărțită în două module: **Modulul „Traiect proiectat”** și **Modulul „Traiect realizat”**, așa încât diferențele dintre caracteristicile unui traiect proiectat și a celui realizat sa fie vizibile, cu toate consecințele care decurg de aici.

Tabelul 2.16. Foia de calcul (Modulul „Proiectat”) cu datele rulate si rezultatele validate

Client												
Sonda: VALIDARE FOAIE DE CALCUL												
Coordonate												
Cap de eruptie XXX XXX XXX Nord				XXX XXX XXX Est								
KOP XXX XX Nord				XXX XXX XXX Est								
Tinta XXX XX Nord				XXX XXX XXX Est								
Azimut Tinta				324,39°								
CALCUL TRAIECT SONDA												
Date de Intrare INPUT METODA Calcul - Curbura Minima												
#	MD	Inclinare	Azimut	TVD	+ N / - S	E / - W	V Sec.	DIS	Deglasare	Azimut Deglasare	Observatii	
0	m	grd.	grd.	Z(m)	m	m	m	grd/30 m	grd	°		
1	300,00	0,00	324,39	360,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	324,38		
2	400,00	0,00	324,39	400,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	324,38		
3	420,00	2,00	324,39	420,00	0,29	0	0,35	3,00	0,35	324,38		
4	450,00	5,00	324,39	449,94	1,78	-1	2,18	3,00	2,18	324,38		
5	480,00	8,00	324,39	479,74	4,54	-3	5,58	3,00	5,58	324,38		
6	510,00	11,00	324,39	509,33	8,56	-6	10,53	3,00	10,53	324,38		
7	540,00	14,00	324,39	538,61	13,84	-10	17,02	3,00	17,02	324,38		
8	570,00	17,00	324,39	567,52	20,36	-15	25,04	3,00	25,04	324,38		
9	600,00	20,00	324,39	595,96	28,10	-20	34,56	3,00	34,56	324,38		
10	630,00	23,00	324,39	623,87	37,03	-27	45,55	3,00	45,55	324,38		
11	660,00	26,00	324,39	651,17	47,15	-34	57,99	3,00	57,99	324,38		
12	690,00	29,00	324,39	677,78	58,41	-42	71,84	3,00	71,84	324,38		
13	720,00	32,00	324,39	703,62	70,79	-51	87,07	3,00	87,07	324,38		
14	750,00	35,00	324,39	728,64	84,25	-60	103,62	3,00	103,62	324,38		
15	763,21	36,32	324,39	739,36	90,51	-65	111,32	3,00	111,32	324,38		
16	1707,20	36,32	324,39	1500,00	545,12	-390	670,48	0,00	670,48	324,38		
17	2029,93	36,32	324,39	1759,98	700,50	-502	861,60	0,00	861,60	324,38		
18	2040,00	36,09	324,39	1768,11	705,34	-505	867,55	0,70	867,55	324,38		
19	2070,00	35,39	324,39	1792,46	719,58	-515	885,07	0,70	885,07	324,38		
20	2100,00	34,69	324,39	1817,02	733,58	-525	902,30	0,70	902,30	324,38		
21	2130,00	33,99	324,39	1841,80	747,34	-535	919,22	0,70	919,22	324,38		
22	2160,00	33,29	324,39	1866,77	760,85	-545	935,83	0,70	935,84	324,38		
23	2190,00	32,59	324,39	1891,95	774,11	-554	952,15	0,70	952,15	324,38		
24	2220,00	31,89	324,39	1917,33	787,12	-564	968,15	0,70	968,15	324,38		
25	2250,00	31,19	324,39	1942,90	799,88	-573	983,84	0,70	983,84	324,38		
26	2280,00	30,49	324,39	1968,66	812,38	-582	999,22	0,70	999,22	324,38		
27	2310,00	29,79	324,39	1994,60	824,63	-591	1014,28	0,70	1014,28	324,38		
28	2340,00	29,09	324,39	2020,73	836,61	-599	1029,02	0,70	1029,02	324,38		
29	2370,00	28,39	324,39	2047,03	848,34	-608	1043,44	0,70	1043,44	324,38		
30	2400,00	27,69	324,39	2073,51	859,80	-616	1057,54	0,70	1057,54	324,38		
31	2430,00	26,99	324,39	2100,16	871,00	-624	1071,32	0,70	1071,32	324,38		
32	2460,00	26,29	324,39	2126,98	881,94	-632	1084,77	0,70	1084,77	324,38		
33	2490,00	25,59	324,39	2153,96	892,61	-639	1097,89	0,70	1097,89	324,38		
34	2520,00	24,89	324,39	2181,09	903,00	-647	1110,68	0,70	1110,68	324,38		
35	2550,00	24,19	324,39	2208,38	913,13	-654	1123,14	0,70	1123,14	324,38		
36	2580,00	23,49	324,39	2235,83	922,99	-661	1135,26	0,70	1135,26	324,38		
37	2610,00	22,79	324,39	2263,41	932,57	-668	1147,05	0,70	1147,05	324,38		
38	2640,00	22,09	324,39	2291,14	941,88	-675	1158,50	0,70	1158,50	324,38		
39	2670,00	21,39	324,39	2319,01	950,91	-681	1169,61	0,70	1169,61	324,38		
40	2700,00	20,69	324,39	2347,01	959,67	-687	1180,38	0,70	1180,38	324,38		
41	2730,00	19,99	324,39	2375,14	968,14	-693	1190,80	0,70	1190,80	324,38		
42	2760,00	19,29	324,39	2403,37	976,36	-700	1210,62	0,70	1210,62	324,38		
43	2790,00	18,59	324,39	2431,77	984,26	-705	1210,62	0,70	1210,62	324,38		
44	2820,00	17,89	324,39	2460,26	991,89	-710	1220,00	0,70	1220,00	324,38		
45	2850,00	17,19	324,39	2488,87	999,24	-716	1229,04	0,70	1229,04	324,38		
46	2880,00	16,49	324,39	2517,58	1006,30	-721	1237,73	0,70	1237,73	324,38		
47	2910,00	15,79	324,39	2546,40	1013,08	-726	1246,07	0,70	1246,07	324,38		
48	2940,00	15,09	324,39	2575,32	1019,57	-730	1254,05	0,70	1254,05	324,38		
49	2970,00	14,39	324,39	2604,33	1025,77	-735	1261,68	0,70	1261,69	324,38		
50	3000,00	13,69	324,39	2633,44	1031,69	-739	1268,96	0,70	1268,96	324,38		
51	3030,00	12,99	324,39	2662,63	1037,32	-743	1275,88	0,70	1275,88	324,38		
52	3060,00	12,29	324,39	2691,90	1042,65	-747	1282,44	0,70	1282,44	324,38		
53	3090,00	11,59	324,39	2721,25	1047,70	-750	1288,65	0,70	1288,65	324,38		
54	3120,00	10,89	324,39	2750,68	1052,45	-754	1294,49	0,70	1294,49	324,38		
55	3150,00	10,19	324,39	2780,17	1056,91	-757	1299,98	0,70	1299,98	324,38		
56	3157,95	10,00	324,39	2788,00	1058,04	-758	1301,37	0,70	1301,37	324,38		
57	3259,49	10,00	324,39	2888,00	1072,38	-768	1319,00	0,00	1319,00	324,38		
58	3281,83	10,00	324,39	2910,00	1075,53	-770	1322,88	0,00	1322,88	324,38		
59	3319,40	10,00	324,39	2947,00	1080,83	-774	1329,41	0,00	1329,41	324,38		
60	3324,48	10,00	324,39	2952,00	1081,55	-775	1330,29	0,00	1330,29	324,38		

2.4. Tortuozitatea sondelor

Tortuozitatea sondei [36] reprezintă o mărime a deviației traiectului găurii de sondă de la o linie dreaptă, reprezentând raportul dintre două puncte oarecare de pe traiectul găurii de sondă împărțită la distanța în linie dreaptă dintre cele două puncte așa ca în figura 2.9.

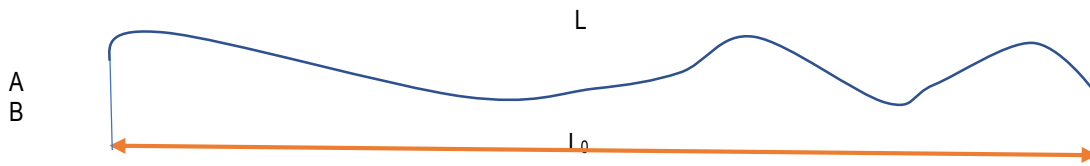


Fig. 2.9. Definirea tortuozității [35]

Relația de calcul a tortuozității este

$$\text{Tortuozitate} = \frac{L}{L_0} \quad (2.22.)$$

În prezent nu există o metoda unitară standardizată pentru cuantificarea tortuozității [36]. Experiența industrială de șantier arată că, în practică, valorile momentelor de torsiune și frecările în gaura de sondă sunt cu mult mai mari decât cele estimate teoretic.

Necunoscutele în ceea ce privește tortuozitatea reală a găurii de sondă rezultă din faptul că parametrii traiectului găurii de sondă respectiv înclinarea și azimutul sunt mășurați în practică din 30 în 30 m (sau la fiecare 100 ft) foraj. În fapt, tortuozitatea găurii de sondă se exprimă ca și intensitatea maxima de deviere în grade /30 m sau grade /100 picioare.[37]

Tortuozitate de lucru sau Running Tortuosity [37] este însumarea, stație cu stație, a curburii totale care înglobează atât curbura rezultată din schimbarea înclinării cât și a azimutului, normalizată la o lungime standard dintre două stații de măsură respectiv 30 m sau 100 ft.

Expresia tortuozității se stabilește ca diferență dintre curburi actuale și cele planificate, împărțite la distanța dintre stațiile de măsură [37]:

$$T = \frac{\sum_{j=1}^n DL_a - DL_p}{MD_j - MD_i} \quad [^\circ/30 \text{ m}] \quad (\text{sau } [^\circ/100\text{ft}]) \quad (2.23)$$

în care :

T este tortuozitatea;

DL_a – Dog Leg (Intensitatea de deviere) actual;

DL_p – Dog Leg (Intensitatea de deviere) proiectat;

$MD_j - MD_i$ – distanța între stațiile de măsură.

Tortuozitatea sondelor este inherentă procesului de foraj și poate fi definită ca și o undulare nedorită a găurii de sondă de la traiectoria proiectată la traiectoria fizic obținută în cursul forajului.

Principalii factori generatori de tortuozitate sunt: sistemele de foraj direcțional respectiv RSS (Rotary Stereable Systems) și SMD (Stereable Mud Motor) acesta generând tortuozitate mai mare; procedurile de foraj direcțional; vibrațiile apărute în ansamblul de fund (BHA) și garnitura de foraj; tipul constructiv al sapei de foraj (lungimea elementelor tăietoare și lungimea sapei); proprietățile mecanice ale rocilor forate; tendința naturală de deviere; stresul tectonic existent.

Efectele tortuozității, în general, sunt efecte cu impact negativ asupra operațiunilor de foraj și, ulterior, asupra operațiunilor de completare și producție a sondei și se traduc în practică prin: creșterea coeficienților de frecare, oboseala mai rapidă a garniturii de foraj, intrarea în flambaj mai rapidă a materialului tubular, uzura prematură a tijelor de pompare, uzura prematură a coloanelor intermediare, etc

Devine DECI evidentă necesitatea modelării în avans a tortuozității așa încât sonda proiectată să țină cont de valorile suplimentare ale intensităților de deviere (DLS. Experiența de proiectare arată că se poate face o modelare acceptabilă și realistă prin aplicarea arbitrară a unor funcții matematice (variație sinusoidală sau aleatorie) [37] asupra înclinării și azimutului pe o perioadă determinată de lungime, care poate fi exprimată în general prin:

$$\text{Inc. Tort} = \text{Inc. Plan} + \Delta \text{Inc.} \quad (2.24)$$

$$Azi_{Tort} = Azi_{Plan} + \Delta Azi.$$

(2.25)

în care, Inc_{Tort} și Azi_{Tort} corespund înclinării și azimutului pentru sonda cu traiect tortuos, prin adăugarea unei variații date ΔInc_{Tort} , respectiv ΔAzi_{Tort} , la valorile proiectate ale înclinării și azimutului [38].

Există doi parametri importanți în modelarea tortuozității: amplitudinea și perioada variațiilor:

- amplitudinea: corespunde variației maxime a unghiului, aplicată peste unghiul unui punct al traiectoriei proiectate (înclinare și azimut); poate fi considerată între $0,1^\circ$ și $1,5^\circ$;
- perioada: corespunde ciclului de lungime pentru variația aplicată. De regulă, o perioadă de 2 - 5 m va corespunde unei micro tortuozități (spiralarea găurii de sondă), iar o perioadă de 30 la 150 m va simula un traiect forat cu în sistem *Slide-Rotary*. Tortuozitatea găurii de sondă se poate modela, aplicându-se una din următoarele metode [38]: metoda curbei sinus; metoda elicoidală; metoda înclinării și azimutului aleatoriu; metoda aleatorie înclinare – dependentă de azimut. În cele ce urmează se vor aplica două metode pentru cazul sondei teoretice WP1A

Metoda curbei sinus [38]

Metoda curbei sinus pleacă de la ipoteza că valorile de înclinare și azimut citite la stațiile de măsurare (*Survey points*) s-ar situa pe o variație sinusoidală. Pe de altă parte, tortuozitatea este proprietatea unei curbe de a fi sinuoasă, și poate fi derivată din ecuația 2.26 [37]. Aceasta înseamnă că unghiul de înclinare α se poate ajusta cu o valoare $\Delta\alpha$ care va corespunde cu unghiul de înclinare α ajustat la valoarea tortuozității $\alpha_{aj} = \alpha + \Delta\alpha$,

în care :

$$\Delta\alpha = \sin(D/P \cdot 2\pi) \cdot M \quad (2.26)$$

unde:

D este adâncimea măsurată în metri sau picioare;

P - perioada în metri sau picioare;

M - magnitudinea sau amplitudinea în grade.

Dacă adâncimea măsurată la punctul de stație de survey este un multiplu întreg a perioadei, atunci :

$$\Delta\alpha = \sin(D/P \cdot 2\pi) = 0 \quad (2.27)$$

Notă. Unghiurile de înclinare sunt considerate întotdeauna ca având valori pozitive.

Dacă termenul $\Delta\alpha$ este negativ, și unghiul de azimut $\varphi = \varphi_n + \Delta\alpha$ este negativ, atunci rezultă:

$$\varphi_n = 360 + \Delta\alpha \quad (2.28)$$

și se rezolvă :

$$\alpha_n = \alpha + \Delta\alpha \quad \text{pentru înclinare} \quad (2.29)$$

$$\varphi_n = \varphi + \Delta\alpha + \psi_{xvc} \quad \text{pentru azimut} \quad (2.30)$$

în care ψ_{xvc} este secțiunea verticală corectată.

$$\text{Dacă } \alpha_n < 0 \Rightarrow \psi_{xvc} = 180^\circ \quad (2.31)$$

sau dacă :

$$\alpha_n \geq 0 \Rightarrow \psi_{xvc} = 0^\circ \quad (2.32)$$

Rezultatele calculelor specifice pentru modelarea tortuozității prin metoda sinusoidală pentru secțiunea orizontală teoretică a sondei WP1A sunt concentrate în tabelul 2.59. S-a folosit o amplitudine de $1,2^\circ$ și o perioadă de 90 m.

Metoda aleatorie înclinare – dependentă de azimut [38]

Unghiul de înclinare modelat cu tortuozitatea

$$\alpha_n = \alpha + \Delta\alpha \quad (2.33)$$

Unghiul de azimut modelat cu tortuozitatea

$$\varphi_n = \varphi + ((\Delta\alpha / (2 \sin \alpha_n)) + \psi_{xvc} \quad (2.34)$$

$$\Delta\alpha = \zeta \times \delta \quad (2.35)$$

în care:

ζ este un număr aleatoriu între -1 și 1;

$$\delta = (\Delta MD / P) \cdot M \quad (2.36)$$

ΔMD - diferența de lungime între două stații succesive de măsurare în metri;

P – perioada în metri;

M – magnitudinea sau amplitudinea în grade;

ψ_{xvc} - corecția transversală.

Rezultatele calculelor specifice pentru modelarea tortuozității prin metoda sinusoidală și prin metoda înclinării aleatorii dependente de azimut [38] pentru secțiunea orizontală teoretică a sondei WP1A sunt concentrate în tabelul 2.17 (s-a

folosit o amplitudine de 0,2°, o perioadă de 6 m, un număr aleatoriu ζ (între -1 și 1) generat în Excel de funcția „RAND()”. Graficele corespunzătoare tortuozității proiectate, tortuozității modelate prin metoda sinus, tortuozității modelate prin metoda înclinării aleatorii dependente de azimut sunt redată în figura 2.10. În modelare s-au folosit datele de înclinare și azimut pentru sonda teoretică WP1A.

Tabelul 2.17. Modelarea tortuozității în secțiunea orizontală prin Metoda Sinusoidală și Aleatorie înclinare dependentă de azimut la sonda WP1A

Modelare Tortuozitate Sinusoidală în Secțiunea Orizontală Sonda WP1A								Tortuozitate modelată Aleatorie înclinare dependentă de Azimut în Secțiunea Orizontală Sonda WP1A					
MD	Incl	Azimut	Perioada	Amplit.	$\Delta\alpha$	Inclin. Sin	Azimut Sin	ζ	$\Delta\alpha$	Inclin. Aleator	Azim. Aleator	Perioada	Amplit.
m	°	°	m	°	°	°	°	Aleator	°	°	°	m	°
0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2640,00	0,00	67,90	90,0	1,20	1,039	1,039	68,9	0,932132298	-	-	-	-	-
2670,00	3,25	67,90	90,0	1,20	-1,039	2,211	66,9	0,153787503	0,153788	3,4	69	6	0,2
2730,00	21,25	67,90	90,0	1,20	1,039	22,289	68,9	0,848633318	1,697267	22,9	70	6	0,2
2760,00	30,25	67,90	90,0	1,20	-1,039	29,211	66,9	0,498150353	0,49815	30,7	68	6	0,2
2790,00	39,25	67,90	90,0	1,20	0,000	39,250	67,9	0,13209125	0,132091	39,4	68	6	0,2
2820,00	48,25	67,90	90,0	1,20	1,039	49,289	68,9	0,695369747	0,69537	48,9	68	6	0,2
2830,00	51,49	67,90	90,0	1,20	0,410	51,900	68,3	0,257789687	0,08593	51,6	68	6	0,2
2850,00	55,00	67,90	90,0	1,20	-1,039	53,961	66,9	0,483750372	0,3225	55,3	68	6	0,2
2880,00	55,00	67,90	90,0	1,20	0,000	55,000	67,9	0,830555065	0,830555	55,8	68	6	0,2
2910,00	56,23	67,90	90,0	1,20	1,039	57,269	68,9	0,034701741	0,034702	56,3	68	6	0,2
2940,00	68,23	67,90	90,0	1,20	-1,039	67,191	66,9	0,892834408	0,892834	69,1	68	6	0,2
2970,00	68,23	67,90	90,0	1,20	0,000	68,230	67,9	0,936975688	0,936976	69,2	68	6	0,2
3000,00	74,23	67,90	90,0	1,20	1,039	75,269	68,9	0,50838732	0,508387	74,7	68	6	0,2
3030,00	80,23	67,90	90,0	1,20	-1,039	79,191	66,9	0,33444222	0,334442	80,6	68	6	0,2
3060,00	86,23	67,90	90,0	1,20	0,000	86,230	67,9	0,383019451	0,383019	86,6	68	6	0,2
3090,00	90,00	66,42	90,0	1,20	1,039	91,039	67,5	0,588208948	0,588209	90,6	67	6	0,2
3120,00	90,00	62,42	90,0	1,20	-1,039	88,961	61,381	0,529384452	0,529384	90,5	63	6	0,2
3150,00	90,00	58,42	90,0	1,20	0,000	90,000	58,420	0,106036389	0,106036	90,1	58	6	0,2
3180,00	90,00	54,42	90,0	1,20	1,039	91,039	55,459	0,944638968	0,944639	90,9	55	6	0,2
3210,00	90,00	50,42	90,0	1,20	-1,039	88,961	49,381	0,054167831	0,054168	90,1	50	6	0,2
3240,00	90,00	46,42	90,0	1,20	0,000	90,000	46,420	0,34369992	0,3437	90,3	47	6	0,2
3270,00	90,00	42,42	90,0	1,20	1,039	91,039	43,459	0,645074971	0,645075	90,6	43	6	0,2
3300,00	90,00	38,42	90,0	1,20	-1,039	88,961	37,381	0,392822728	0,392823	90,4	39	6	0,2
3330,00	90,00	34,42	90,0	1,20	0,000	90,000	34,420	0,04109171	0,041092	90,0	34	6	0,2
3360,00	90,00	30,42	90,0	1,20	1,039	91,039	31,459	0,716455224	0,716455	90,7	31	6	0,2
3390,00	90,00	26,42	90,0	1,20	-1,039	88,961	25,381	0,836979006	0,836979	90,8	27	6	0,2
3420,00	90,02	22,42	90,0	1,20	0,000	90,020	22,420	0,077346041	0,077346	90,1	22	6	0,2
3450,00	90,17	18,42	90,0	1,20	1,039	91,209	19,459	0,179513705	0,179514	90,3	19	6	0,2
3480,00	90,32	14,42	90,0	1,20	-1,039	89,281	13,381	0,551724432	0,551724	90,9	15	6	0,2
3510,00	90,46	10,42	90,0	1,20	0,000	90,460	10,420	0,561976357	0,561976	91,0	11	6	0,2
3540,00	90,61	6,43	90,0	1,20	1,039	91,649	7,469	0,572300833	0,572301	91,2	7	6	0,2
3570,00	90,75	2,43	90,0	1,20	-1,039	89,711	1,391	0,358506738	0,358507	91,1	3	6	0,2
3600,00	90,80	360,00	90,0	0,200	0,000	90,000	360,000	0,378473971	0,378474	91,2	360	6	0,2
3630,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,2276192	0,227619	91,1	360	6	0,2
3660,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,763684563	0,763685	91,6	360	6	0,2
3690,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,318347053	0,318347	91,2	360	6	0,2
3720,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,923598651	0,923599	91,8	360	6	0,2
3750,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,542058791	0,542059	91,4	360	6	0,2
3780,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,137565571	0,137566	91,0	360	6	0,2
3810,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,613835221	0,613835	91,5	360	6	0,2
3840,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,050353182	0,050353	90,9	360	6	0,2
3870,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,650923267	0,650923	91,5	360	6	0,2
3900,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,781297596	0,781298	91,6	360	6	0,2
3930,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,159473957	0,159474	91,0	360	6	0,2
3960,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,794266116	0,794266	91,6	360	6	0,2
3990,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,406066618	0,406067	91,2	360	6	0,2
4020,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,075330622	0,075331	90,9	360	6	0,2
4050,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,802703748	0,802704	91,6	360	6	0,2
4080,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,237451431	0,237451	91,1	360	6	0,2
4110,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,820759105	0,820759	91,7	360	6	0,2
4140,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,227510124	0,22751	91,1	360	6	0,2
4170,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,439714454	0,439714	91,3	360	6	0,2
4200,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,79865561	0,798656	91,6	360	6	0,2
4230,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,72297461	0,722975	91,6	360	6	0,2
4260,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,634901221	0,634901	91,5	360	6	0,2
4290,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,953548861	0,953549	91,8	360	6	0,2
4320,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,661050428	0,66105	91,5	360	6	0,2
4350,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,296129305	0,296129	91,1	360	6	0,2
4380,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,580441892	0,580442	91,4	360	6	0,2
4410,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,129137078	0,129137	91,0	360	6	0,2
4440,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,26975303	0,269753	91,1	360	6	0,2
4470,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,382696755	0,382697	91,2	360	6	0,2
4500,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,738435169	0,738435	91,6	360	6	0,2
4530,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,274435203	0,274435	91,1	360	6	0,2
4560,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,654608367	0,654608	91,5	360	6	0,2
4590,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,322214762	0,322215	91,2	360	6	0,2
4620,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,189711261	0,189711	91,0	360	6	0,2
4650,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,704173317	0,704173	91,5	360	6	0,2
4680,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,818149806	0,81815	91,7	360	6	0,2
4710,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039	0,616481588	0,616482	91,5	360	6	0,2
4740,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961	0,613546088	0,613546	91,5	360	6	0,2
4770,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000	0,585127963	0,585128				

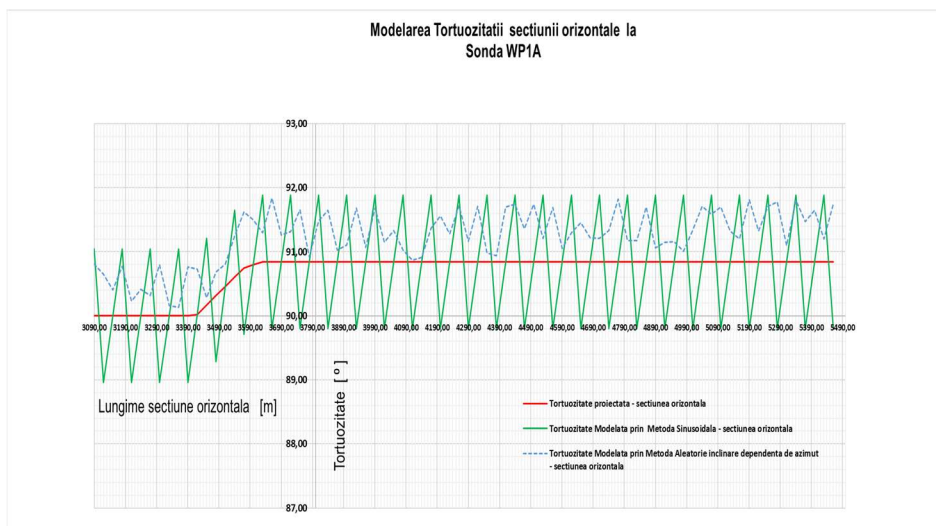


Fig. 2.10. Modelarea tortuozității în secțiunea orizontală prin metoda sinusoidală și aleatorie (amplitudine 0.2° , perioada 6 m , și un nr. aleatoriu ζ , generat in Excel de funcția „ RAND()”.

Graficul din figura 2.10 este rezultatul prelucrării datelor din tabelul 2.17.

2.5. Indicele de dificultate al forajului direcțional [40]

Condiții de foraj neconvenționale și / sau extreme

Sintetic, aceste sonde de hidrocarburi se referă la:

- Sondele forate în medii cu parametri extremi (presiune și temperatură cu mult peste gradientii recunoscuți ca standard sau normali: de exemplu, sonde HPHT (presiune și temperatură ridicate), având presiunea de formațiune de peste 70 MPa și temperatura la talpă de peste 170 C [41];
- Sondele forate în condiții extreme de stres geo-tectonic;
- Sondele forate la adâncimi foarte mari (peste 6500 m), inclusiv adâncimi de apă foarte mari (peste 2000 m);
- Sondele ale căror traiectorii au o geometrie ce depășește cu mult conceptul de „gaură verticală” sau „înclinată”, deci sonde orizontale, sonde direcționale cu deplasare foarte mare, sonde multilaterale, sonde ERD (*Extended Reach Drilling*, pentru care raportul dintre deplasarea pe orizontală și adâncimea pe verticală depășește raportul 2:1 [36] – figura 2.12);
- Sondele orizontale de mică adâncime dar având o rază foarte scurtă de curbură;
- Sondele care penetrează sau traversează strate cu conținut mare în fluide corozive (H_2S și CO_2) etc.

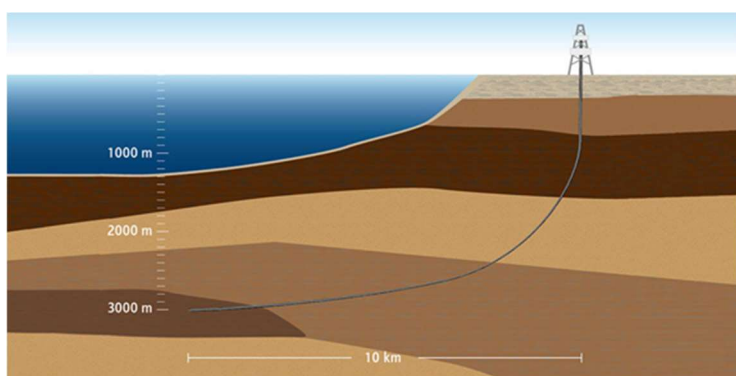


Figura 2.12. Sonda ERD – foraj direcțional extins

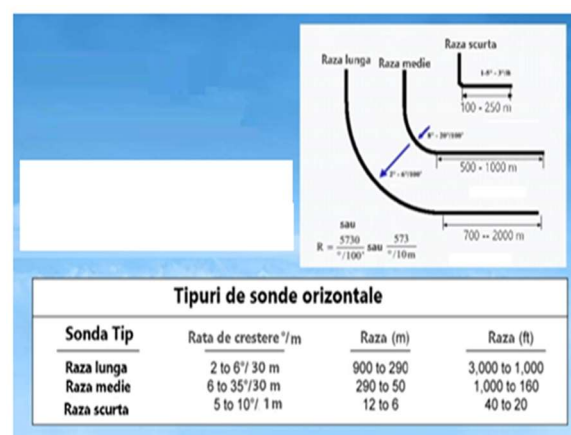


Fig. 2.13. Clasificarea sondelor orizontale [42]

În figura 2.13 este prezentată clasificarea sondelor orizontale în funcție de gradientul de creștere al înclinării găurii de sondă. Creșterea gradului de dificultate al sondelor, fapt care implică solicitări sporite pentru toate elementele

și sistemele instalațiilor de foraj, ca și a tehnologiilor folosite, a făcut necesară găsirea unui sistem unitar de măsurare a gradului de complexitate al sondelor, astfel încât proiectarea tehnică a acestora, bugetarea aferentă și apoi execuția lucrărilor să fie efectuate pe baze cât mai realiste.

Indicele de dificultate al forajului direcțional (DDI) a fost propus de Schlumberger [40] pentru a putea evalua dificultatea forajului direcțional și se bazează pe utilizarea a trei parametri definitorii ai găurii de sondă:

- ✚ adâncimea măsurată – MD, m;
- ✚ deplasarea sondei pe orizontală – D, m;
- ✚ adâncimea verticală a sondei – TVD, m;
- ✚ tortuozitatea (curbura totală a sondei) – TT, °.

Expresia de calcul este

$$DDI = \text{Log} \left[3 MD \cdot \frac{D}{TVD} \cdot TT \right] \quad [40] \quad (2.38)$$

În practica de proiectare a sondelor pentru hidrocarburi neconvenționale este bine ca DDI să fie calculat sub forma a două valori : DDI_{Proiectat} respectiv DDI_{TMod} (ia în considerare tortuozitatea modelată) - care se vor compara cu DDI_{Efectiv} cel ce rezulta din forajul efectiv al sondei. Acest fapt ajută foarte mult bugetarea sondei (ridicarea unui AFE mai realistic) precum și o metodă de comparație între sonde din punct de vedere cel puțin al traiectului.

Procedura practică de calcul, așa după cum se aplică la sonda ipotetica WP1A, este următoarea:

- 1) Se modelează (prin metoda sinus sau aleatorie) tortuozitatea traiectului proiectat - tabelul 2.18.
- 2) Se introduc datele de proiectare pentru înclinare, azimut, adâncimi măsurate, adâncimea de inițiere a deviației sondei începând de la cota 0 și până la adâncimea finală și înclinările și azimuturile rezultate prin modelarea tortuozității prin metoda sinusoidală în Foaia „Meniu” , rezultând – tabelul 2.19.
- 3) În „ Foaia Meniu – tabelul 2.14 se însumează valorile intensitatilor de deviere (DLS) atât proiectat cât și modelat prin metoda sinusoidală, rezultând valorile tortuozității totale pentru sonda proiectată WL1A și pentru tortuozitatea totală modelată, respectiv:

$$TT_{\text{Proiectat}} = 156^\circ, TT_{\text{Modelat}} = 282,3^\circ.$$

Tabelul 2.18. Modelarea tortuozității prin metoda sinus pentru traiectul sondei teoretice WP1A

Modelare Tortuozitate Sinusoidal in Sectiunea Orizontala Sonda WP1A							
MD	Incl	Azimut	Perioada	Amplit.	$\Delta\alpha$	Inclin. Sin	Azimut Sin
m	°	°	m	°	°	°	°
0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
2640,00	0,00	67,90	90,0	1,20	1,039	1,039	68,9
2670,00	3,25	67,90	90,0	1,20	-1,039	2,211	66,9
2730,00	21,25	67,90	90,0	1,20	1,039	22,289	68,9
2760,00	30,25	67,90	90,0	1,20	-1,039	29,211	66,9
2790,00	39,25	67,90	90,0	1,20	0,000	39,250	67,9
2820,00	48,25	67,90	90,0	1,20	1,039	49,289	68,9
2830,00	51,49	67,90	90,0	1,20	0,410	51,900	68,3
2850,00	55,00	67,90	90,0	1,20	-1,039	53,961	66,9
2880,00	55,00	67,90	90,0	1,20	0,000	55,000	67,9
2910,00	56,23	67,90	90,0	1,20	1,039	57,269	68,9
2940,00	68,23	67,90	90,0	1,20	-1,039	67,191	66,9
2970,00	68,23	67,90	90,0	1,20	0,000	68,230	67,9
3000,00	74,23	67,90	90,0	1,20	1,039	75,269	68,9
3030,00	80,23	67,90	90,0	1,20	-1,039	79,191	66,9
3060,00	86,23	67,90	90,0	1,20	0,000	86,230	67,9
3090,00	90,00	66,42	90,0	1,20	1,039	91,039	67,5
3120,00	90,00	62,42	90,0	1,20	-1,039	88,961	61,381
3150,00	90,00	58,42	90,0	1,20	0,000	90,000	58,420
3180,00	90,00	54,42	90,0	1,20	1,039	91,039	55,459
3210,00	90,00	50,42	90,0	1,20	-1,039	88,961	49,381
3240,00	90,00	46,42	90,0	1,20	0,000	90,000	46,420
3270,00	90,00	42,42	90,0	1,20	1,039	91,039	43,459
3300,00	90,00	38,42	90,0	1,20	-1,039	88,961	37,381
3330,00	90,00	34,42	90,0	1,20	0,000	90,000	34,420
3360,00	90,00	30,42	90,0	1,20	1,039	91,039	31,459
3390,00	90,00	26,42	90,0	1,20	-1,039	88,961	25,381
3420,00	90,02	22,42	90,0	1,20	0,000	90,020	22,420
3450,00	90,17	18,42	90,0	1,20	1,039	91,209	19,459
3480,00	90,32	14,42	90,0	1,20	-1,039	89,281	13,381
3510,00	90,46	10,42	90,0	1,20	0,000	90,460	10,420
3540,00	90,61	6,43	90,0	1,20	1,039	91,649	7,469
3570,00	90,75	2,43	90,0	1,20	-1,039	89,711	1,391
3600,00	90,80	360,00	90,0	1,20	0,000	90,800	360,000
3630,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
3660,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
3690,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
3720,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
3750,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
3780,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
3810,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
3840,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
3870,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
3900,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
3930,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
3960,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
3990,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4020,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4050,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4080,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4110,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4140,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4170,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4200,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4230,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4260,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4290,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4320,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4350,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4380,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4410,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4440,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4470,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4500,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4530,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4560,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4590,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4620,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4650,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4680,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4710,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4740,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4770,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4800,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4830,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4860,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4890,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
4920,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
4950,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
4980,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
5010,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
5040,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
5070,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
5100,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
5130,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
5160,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
5190,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
5220,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
5250,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
5280,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
5310,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
5340,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
5370,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961
5400,00	90,84	360,00	90,0	1,20	0,000	90,840	360,000
5430,00	90,84	360,00	90,0	1,20	1,039	91,879	361,039
5460,00	90,84	360,00	90,0	1,20	-1,039	89,801	358,961

Tabelul 2.19. Introducerea datelor de proiectare cu valori modelate pentru tortuozitate atât în înclinare cât și în azimut

Client:

Sonda: WP1A

Coordinate

Cap Eruptie XXX XXX XXX XXX XXX XXX Est

KOP XXX X Nord XXX XXX XXX Est

Tinta XXX X Nord XXX XXX XXX Est

Azimut Tinta 1 0

CALCUL TRIAIECT SONDA WP1A

METODA Calcul - Curbura Minima

Date de Intrare

Tortuozitate Modelata sinusoidal: Amplitudine 1,2° ; Perioada 90 m

PROIECTAT

(Date calculate)

Date de intrare

MODELAT

(DATE calculate)

#	MD	Inclin.	Azim.	TVD	+N / - S	E / - W	V Sec	DLS	Deplasare	Azimut	MD	Inclinare	Azimut	TVD	+N / - S	E / - W	V Sec	DLS	Deplasare	Azimut	Observatii
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	m	m	√30 m	ΔS (m)	Deplasare	m	grd.	grd.	Z (m)	m	m	m	√30 m	ΔS (m)	Deplasare	
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
2	2640,00	0,00	67,90	2640,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,9	2640,00	1,0	68,94	2639,9	8,6	22,3	9,0	0,0	23,9	69,0	KOP (initiere inclinare)
3	2670,00	3,25	67,90	2670,00	0,3	0,8	0,3	3,2	0,9	67,9	2670,00	2,2	66,86	2669,8	8,9	23,1	9,3	1,2	24,8	68,9	
4	2730,00	21,25	67,90	2728,4	5,1	12,5	5,3	9,0	13,5	67,9	2730,00	22,3	68,94	2728,2	13,5	34,9	14,1	10,0	37,5	68,9	
5	2760,00	30,25	67,90	2755,4	10,0	24,6	10,4	9,0	26,6	67,9	2760,00	29,2	66,86	2755,2	18,4	47,0	19,2	7,0	50,5	68,6	
6	2790,00	39,25	67,90	2780,0	16,4	40,4	17,1	9,0	43,6	67,9	2790,00	39,3	67,90	2780,0	24,9	62,6	26,0	10,1	67,3	68,3	
7	2820,00	48,25	67,90	2801,6	24,2	59,6	25,2	9,0	64,4	67,9	2820,00	49,3	68,94	2801,4	32,6	82,0	34,0	10,1	88,2	68,4	
8	2830,00	51,49	67,90	2808,1	27,1	66,7	28,2	9,7	72,0	67,9	2830,00	51,9	68,31	2807,8	35,4	89,2	36,9	8,0	96,0	68,4	
9	2850,00	55,00	67,90	2820,1	33,1	81,6	34,5	5,3	88,0	67,9	2850,00	54,0	66,86	2819,8	41,5	104,0	43,2	3,5	111,9	68,3	
10	2880,00	55,00	67,90	2837,3	42,4	104,3	44,1	0,0	112,6	67,9	2880,00	55,0	67,90	2837,2	50,9	126,5	53,0	1,3	136,3	68,1	
11	2910,00	56,23	67,90	2854,2	51,7	127,3	53,8	1,2	137,4	67,9	2910,00	57,3	68,94	2854,0	60,0	149,7	62,6	2,4	161,2	68,2	
12	2940,00	68,23	67,90	2868,2	61,6	151,8	64,2	12,0	163,9	67,9	2940,00	67,2	66,86	2867,9	70,0	174,2	73,0	10,1	187,8	68,1	
13	2970,00	68,23	67,90	2879,3	72,1	177,6	75,1	0,0	191,7	67,9	2970,00	68,2	67,90	2879,3	80,7	199,8	84,1	1,4	215,5	68,0	
14	3000,00	74,23	67,90	2888,9	82,8	203,9	86,3	6,0	220,1	67,9	3000,00	75,3	68,94	2888,7	91,2	226,3	95,0	7,1	244,0	68,1	
15	3030,00	80,23	67,90	2895,6	93,8	231,0	97,7	6,0	249,3	67,9	3030,00	79,2	66,86	2895,3	102,2	253,4	106,5	4,4	273,2	68,1	
16	3060,00	86,23	67,90	2899,1	105,0	258,6	109,4	6,0	279,1	67,9	3060,00	86,2	67,90	2899,1	113,6	280,9	118,4	7,1	303,0	68,0	
17	3090,00	90,00	66,42	2900,1	116,7	286,2	121,5	4,0	309,1	67,9	3090,00	91,0	67,46	2899,8	125,0	308,6	130,2	4,8	333,0	68,0	
18	3120,00	90,00	62,42	2900,1	129,6	313,3	134,9	4,0	339,0	67,6	3120,00	89,0	61,38	2899,8	138,0	335,6	143,6	6,4	362,9	67,7	
19	3150,00	90,00	58,42	2900,1	144,4	339,4	150,1	4,0	368,8	67,0	3150,00	90,0	58,42	2900,1	153,0	361,6	159,1	3,1	392,6	67,1	
20	3180,00	90,00	54,42	2900,1	161,0	364,4	167,2	4,0	398,4	66,2	3180,00	91,0	55,46	2899,8	169,4	386,7	175,9	3,1	422,2	66,4	
21	3210,00	90,00	50,42	2900,1	179,3	388,1	185,9	4,0	427,6	65,2	3210,00	89,0	49,38	2899,8	187,6	410,5	194,6	6,4	451,3	65,5	
22	3240,00	90,00	46,42	2900,1	199,2	410,6	206,1	4,0	456,3	64,1	3240,00	90,0	46,42	2900,1	207,8	432,8	215,1	3,1	480,0	64,4	
23	3270,00	90,00	42,42	2900,1	220,6	431,6	227,9	4,0	484,7	63,0	3270,00	91,0	43,46	2899,8	229,0	453,9	236,7	3,1	508,4	63,3	
24	3300,00	90,00	38,42	2900,1	243,5	451,0	251,1	4,0	512,5	61,7	3300,00	89,0	37,38	2899,8	251,8	473,4	259,8	6,4	536,2	62,0	
25	3330,00	90,00	34,42	2900,1	267,6	468,8	275,5	4,0	539,8	60,3	3330,00	90,0	34,42	2900,1	276,1	491,0	284,4	3,1	563,3	60,7	
26	3360,00	90,00	30,42	2900,1	292,9	484,9	301,1	4,0	566,5	58,9	3360,00	91,0	31,46	2899,8	301,3	507,3	309,9	3,1	590,0	59,3	
27	3390,00	90,00	26,42	2900,1	319,3	499,2	327,7	4,0	592,6	57,4	3390,00	89,0	25,38	2899,8	327,7	521,5	336,5	6,4	615,9	57,9	
28	3420,00	90,02	22,42	2900,1	346,6	511,6	355,3	4,0	617,9	55,9	3420,00	90,0	22,42	2900,1	355,1	533,7	364,1	3,1	641,0	56,4	
29	3450,00	90,17	18,42	2900,0	374,7	522,0	383,6	4,0	642,6	54,4	3450,00	91,2	19,46	2899,8	383,1	544,4	392,3	3,2	665,7	54,9	
30	3480,00	90,32	14,42	2899,9	403,5	530,5	412,5	4,0	666,5	52,8	3480,00	89,3	13,38	2899,7	411,9	552,9	421,2	6,4	689,4	53,3	
31	3510,00	90,46	10,42	2899,7	432,8	537,0	441,9	4,0	689,7	51,2	3510,00	90,5	10,42	2899,7	441,2	559,1	450,7	3,2	712,2	51,7	
32	3540,00	90,61	6,43	2899,4	462,4	541,4	471,6	4,0	712,0	49,5	3540,00	91,6	7,47	2899,2	470,8	563,7	480,4	3,2	734,5	50,2	
33	3570,00	90,75	2,43	2899,1	492,3	543,7	501,6	4,0	733,5	47,9	3570,00	89,7	1,39	2898,8	500,7	566,1	510,3	6,4	755,7	48,5	
34	3600,00	90,80	0,00	2898,6	522,3	544,3	531,6	2,4	754,4	46,2	3600,00	90,8	360,00	2898,7	530,7	566,4	540,3	1,8	776,2	46,9	
35	3630,00	90,84	0,00	2898,2	552,3	544,3	561,6	0,0	775,5	44,6	3630,00	91,9	361,04	2898,0	560,7	566,7	570,3	1,5	797,2	45,3	
36	3660,00	90,84	0,00	2897,8	582,3	544,3	591,6	0,0	797,1	43,1	3660,00	89,8	358,96	2897,5	590,7	566,7	600,3	2,9	818,6	43,8	
37	3690,00	90,84	0,00	2897,3	612,3	544,3	621,6	0,0	819,3	41,7	3690,00	90,8	360,00	2897,4	620,7	566,4	630,3	1,5	840,3	42,4	
38	3720,00	90,84	0,00	2896,9	642,3	544,3	651,6	0,0	841,9	40,3	3720,00	91,9	361,04	2896,7	650,7	566,7	660,3	1,5	862,9	41,1	
39	3750,00	90,84	0,00	2896,5	672,3	544,3	681,6	0,0	865,0	39,0	3750,00	89,8	358,96	2896,2	680,7	566,7	690,3	2,9	885,7	39,8	
40	3780,00	90,84	0,00	2896,0	702,3	544,3	711,6	0,0	888,6	37,8	3780,00	90,8	360,00	2896,1	710,7	566,4	720,3	1,5	908,8	38,6	
41	3810,00	90,84	0,00	2895,6	732,3	544,3	741,5	0,0	912,4	36,6	3810,00	91,9	361,04	2895,3	740,7	566,7	750,3	1,5	932,6	37,4	
42	3840,00	90,84	0,00	2895,1	762,3	544,3	771,5	0,0	936,7	35,5	3840,00	89,8	358,96	2894,9	770,7	566,7	780,3	2,9	956,6	36,3	
43	3870,00	90,84	0,00	2894,7	792,3	544,3	801,5	0,0	961,3	34,5	3870,00	90,8	360,00	2894,7	800,7	566,4	810,3	1,5	980,8	35,3	
44	3900,00	90,84	0,00	2894,7	792,3	544,3	801,5	0,0	961,3	34,5	3900,00	91,9	361,04	2894,0	830,7	566,7	840,3	1,5	1005,5	34,3	
45	3930,00	90,84	0,00	2894,3	822,3	544,3	831,5	0,0	986,1	33,5	3930,00	89,8	358,96	2893,6	860,6	566,7	870,3	2,9	1030,5	33,4	
46	3960,00	90,84	0,00	2893,8	852,3	544,3	861,5	0,0	1011,3	32,6	3960,00	90,8	360,00	2893,4	890,6	566,4	900,3	1,5	1055,5	32,5	
47	3990,00	90,84	0,00	2893,49																	

Cunoscând $MD_{\text{Proiectat}} = 5460 \text{ m}$; $TVD_{\text{Proiectat}} = 2872 \text{ m}$; $TVD_{\text{Tmodelat}} = 2871 \text{ m}$, precum și deplasările proiectate și modelate:

$D_{\text{Proiectat}} = 2414,3 \text{ m}$ și respectiv $D_{\text{Modelat}} = 2456,6 \text{ m}$.

Introducând datele în relația 2.38 se obține indicele de dificultate al forajului direcțional proiectat și modelat:

$$DDI_{\text{Proiectat}} = \text{Log} \left[3 MD \cdot \frac{D}{TVD} \cdot TT \right] = \text{Log} \left[3 \times 5460 \times \frac{2414,3}{2872} \times 156 \right] = 6,33$$

$$DDI_{\text{TModelat}} = \text{Log} \left[3 \times 5460 \times \frac{2456,6}{2871,1} \times 282,3 \right] = 6,6.$$

Este deci de așteptat ca în practică, după executarea forajului, indicele de dificultate al forajului direcțional pentru sonda WP1A să se situeze între 6 și 7. Ca plajă de valori în industrie, DDI poate lua valori între 1 și 10. Planul de foraj direcțional al sondei WP1A este reprezentat în figura 2.14.

Variația intensității de deviere (DLS) proiectat și modelat este destul de importantă și este prezentată în figura 2.15, iar consecințele vor fi analizate în capitolele următoare.

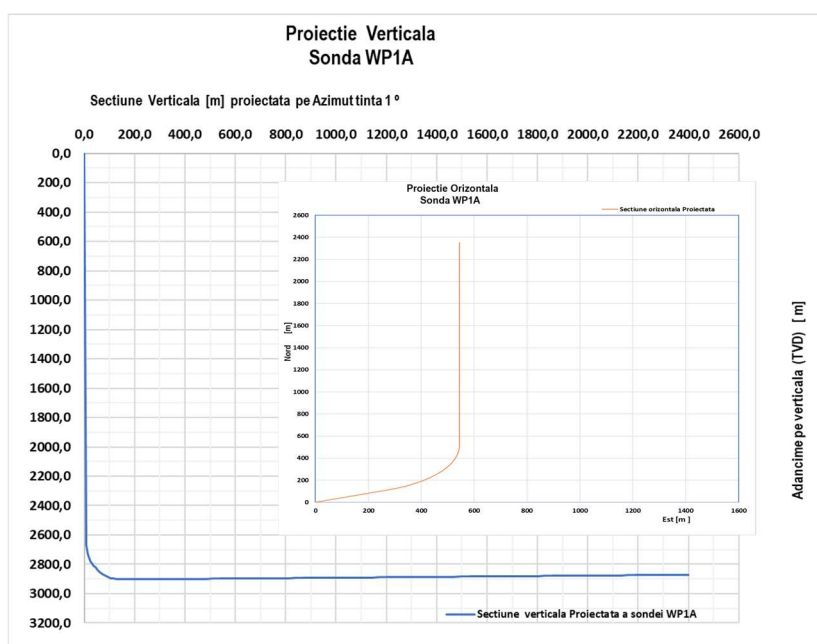


Fig.2.14. Planul de foraj direcțional pentru sonda WP1A

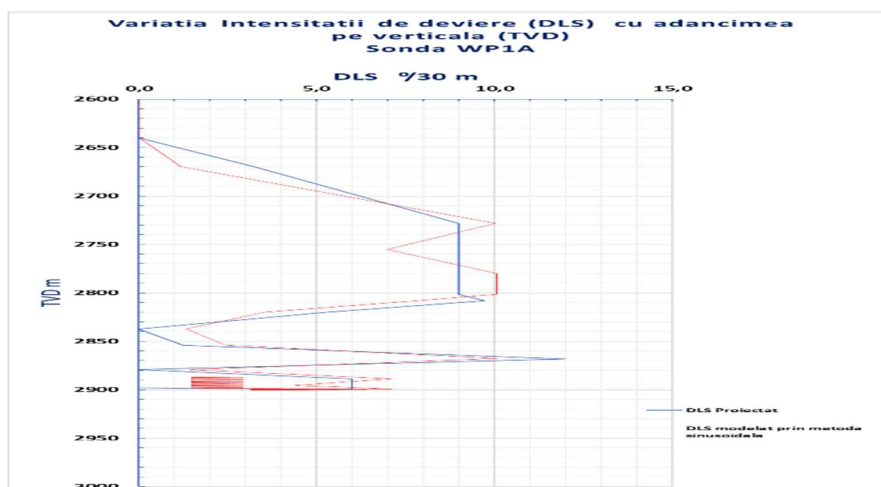


Fig. 2.15. Variația intensității de deviere (Dog Leg Severity) pentru traiecul proiectat și realizat la Sonda WP1A

Influența curburilor asupra garniturii de foraj – estimarea curburii maxime

3.1. Ipoteze preliminare

În cazul practic al sondei de studiu WP1A, în figura 3.1 este prezentată proiecția verticală pentru traiectul proiectat și realizat, în figura 3.2 – proiecția orizontală pentru traiectul proiectat și realizat, iar în figura 3.3 – variația intensității de deviere *Dog Leg Severity* de-a lungul adâncimii măsurate. Totodată, în tabelul 3.1 sunt prezentați parametrii traiectului găurii de sondă realizați efectiv, în comparație cu traiectoria proiectată și modelată.

Din tabelul 3.1 se observă că tortuozitatea totală modelată pentru sonda WP1A este mai mare decât tortuozitatea totală efectivă după terminarea forajului, respectiv 282° față de 259° . Din același tabel se observă că tortuozitatea totală rezultată din traiectoria proiectată este mai mică atât decât tortuozitatea modelată cât și tortuozitate reală, respectiv 156° față de 282° și 259° . Valori ale tortuozității se obțin prin măsurători de înclinare și azimut din metru în metru (microtortuozitate), dacă bugetul sondei permite, și dacă scopul sondei impune asemenea nivel de acuratețe.

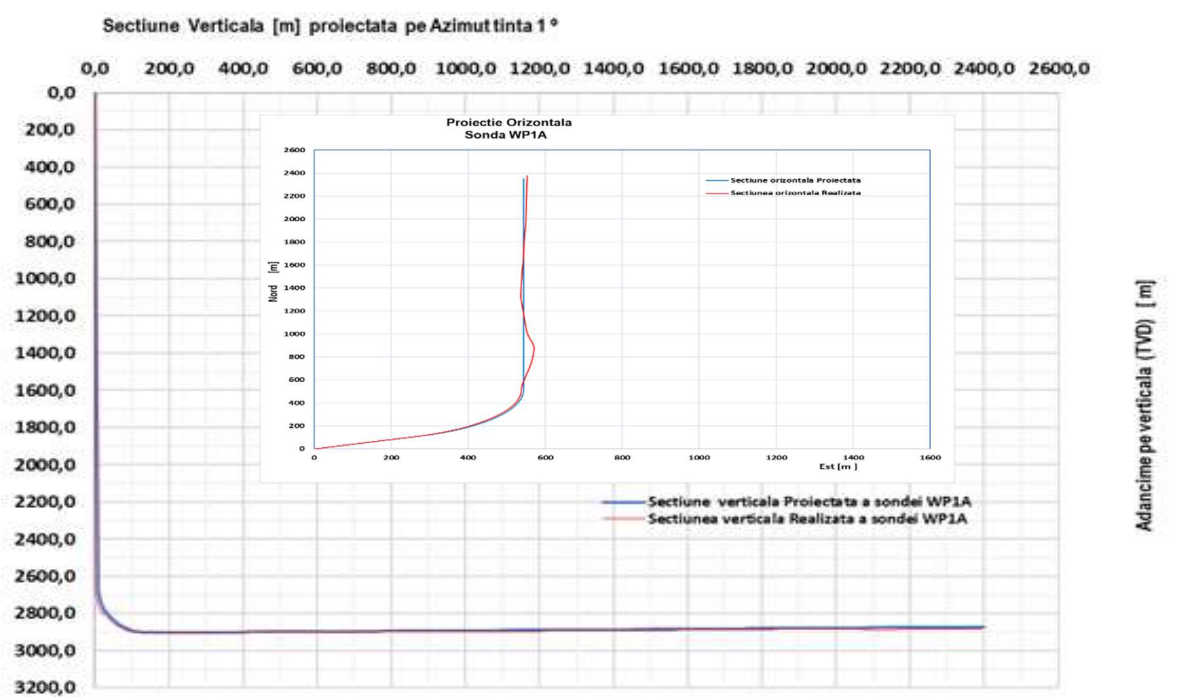


Fig. 3.1.&3.2 Proiecția în plan vertical & orizontal a sondei de studiu WP1A; traiect proiectat și realizat

Tabelul 3.1. Sonda Sonda WP1A Traiect proiectat, modelat și realizat efectiv

Client:
Sonda: **WP1A**
Coordinate
Cap Eruptle XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX Est
KOP XXXX X Nord XXXX XXXX XXXX Est
Tinta XXXX X Nord XXXX XXXX XXXX Est

Azimuth Tinta	1	0
---------------	---	---

CALCUL TRAIECT SONDA WP1A
METODA Calcul - Curbura Minima

Tortuozitate Modelata sinusoidal: Amplitudine 1,2°; Perioada 90 m

[illegible]

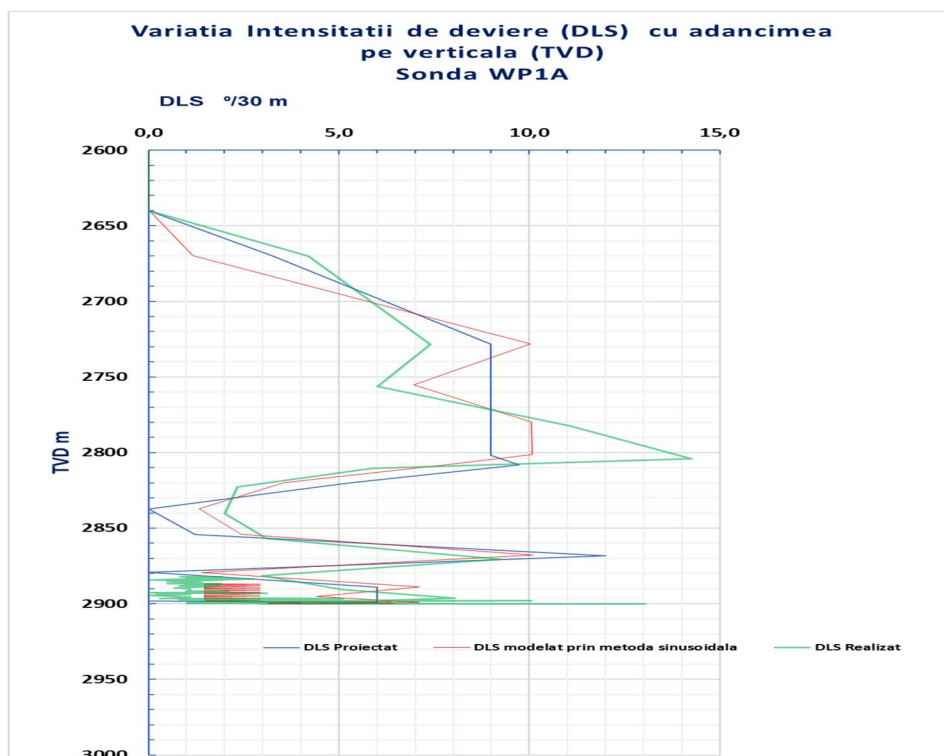


Fig. 3.3. Variația DLS proiectat-modelat – realizat, la sonda WP1A

3.2. Garnitura de foraj

Primul element din componența unei instalații de foraj indiferent de tip, mărime și forța de acționare, asupra căruia curburile traiectului găurii de sondă acționează direct cu implicații și rezultate majore, este garnitura de foraj. Garnitura de foraj este unul dintre componentele de bază a tehnologiei de foraj, fiind alcătuită dintr-un ansamblu de tuburi din oțel care se conectează între ele cu filete speciale.

Garnitura de foraj se află în permanent contact cu fluidele existente în gaura de sondă. Ea urmează pas cu pas traseul găurii de sondă fiind în permanență în contact parțial cu pereții găurii de sondă. În timpul exploatării sale, garnitura de foraj preia triaxial orice încărcare mecanică și hidrolică singulară și/ sau combinată care este exercitată asupra ei. Caracteristicile, materialele, dimensiunile, proprietățile fizico mecanice pentru prăjinile de foraj și racorduri speciale care se fabrică actualmente pe plan mondial sunt prezentate extensiv în cel puțin două publicații, cu aplicabilitate totală în proiectarea, operarea și inspecția garniturilor de foraj, respectiv standardul API RP7 G [43] și Standard DS 1 – *Drill Stem Design and Operation* -TH Hil Associates,2004 [44].

3.3 Mecanismele care stau la baza avariilor în garniturii de foraj

Suprasarcina [44] este un mecanism clasic abordat de rezistența materialelor, componentele garniturii de foraj fiind proiectate să suporte în timpul exploatării încărcările mecanice anticipate

Oboseala [44] este un mecanism, care deși este demonstrat ca apariție în practică, (cauzând foarte multe probleme), totuși suportul teoretic al acestui fenomen este mult mai puțin cunoscut. Fenomenul de oboseală a materialelor este indus de încărcări mecanice ciclice, care au loc pe perioade mari de timp, și care se accentuează extrem de repede în mediu coroziv, și/sau prin apariția unor micro fisuri inițiale în componentele respective.

Coeficienți de proiectare – Coeficienți de siguranță în proiectare [44]

Se aplică în proiectarea garniturii de foraj, așa încât să fie satisfăcute anumite limitări de proiectare. Coeficienții de siguranță la tracțiune și torsiune – sunt utilizați pentru fiecare element a garniturii de foraj așa încât să existe în timpul exploatării suficientă margine pentru rezistența la tracțiune și torsiune. Coeficientul de siguranță la flambaj – este utilizat pentru asigurarea marginii suficiente în greutatea ansamblului de fund (BHA) așa încât să evite flambarea garniturii de foraj și a sculelor de impact (geală), sub influența efortului de compresiune mecanică. În mod uzual acești

coeficienți de siguranță au valori cuprinse între 1 și 1,3. Coeficienți cu valori mai mari înseamnă un proiect mai conservativ.

Limitări de proiectare: Limitările de proiectare sunt criteriile pe care un proiect trebuie să le îndeplinească, așa încât proiectul să fie considerat sigur.

Standardul DS1 Ed. 3 [44] recomandă două limitări de proiectare pentru suprasarcină: tracțiunea suplimentară minimă și factorul maxim de încărcare

Standardul DS1 Ed. 3 [44] recomandă patru limitări de proiectare pentru oboseală: rația rezistenței la încovoire (BSR); rația rigidității maxime (SR); indexul maxim al curburii (CI); indexul stabilității maxime (SI).

Rația rezistenței la încovoire - BSR [44] se aplică conexiunilor / racordurilor Cep-Mufă pentru prăjini grele (drillcolare) sau componente cu rigiditate mare; motoare de fund, stabilizatori, lărgitori. Nu se aplică la HWDP (prăjini de trecere), prăjini de foraj cu excepția cepului unei HWDP înșurubat în mufa de prăjină grea. Valorile BSR se găsesc calculate și tabelate pentru fiecare tip de conexiune corespunzătoare unui diametru de prăjină grea. Un BSR balansat, va avea ca efect o rezistență la oboseală sporită pentru cepul și mufa racordului.

Rația rigidității maxime - SR [44] se aplică la schimbarea suprafețelor secțiunilor elementelor ansamblului de fund (BHA) de la prăjini grele (drillcolare) către prăjini de foraj. Nu se aplică la schimbarea secțiunilor prăjinilor de foraj.

Indexul maxim al curburii - CI [44] se aplică la corpul prăjinilor de foraj, care se rotesc în secțiuni de gaură de sondă curbe, și ia în considerare curbura găurii de sondă, diametrul și greutatea prăjinilor de foraj, gradul de oțel, clasa de uzură și sarcina axială în secțiunea studiată. Deoarece sarcina axială joacă un rol important în rezistența la oboseală, CI se calculează atât la scenariul foraj cât și la corectare ascendentă (backreaming).

Indexul stabilității maxime - SI [44] se aplică elementelor ansamblului de fund prăjini grele și HWDP (prăjini de trecere) care sunt în flambaj. Este o măsură cantitativă, relativă a rezistenței la oboseală a ansamblului de fund aflat în starea de flambaj. Rezumativ, coeficienții de siguranță și limitările de proiectare [44] sunt prezentați în tabelul 3.2, iar în tabelul 3.3 – valori recomandate BSR.

Tabelul 3.2. Coeficienți de siguranță și limitări la proiectare

Coeficient sau Limitare	Grup Proiectare 1	Grup Proiectare 2	Grup Proiectare 3
BSR	Din Tabelul 52		
SR	≤5,5	≤5,5	≤3,5
CI	≤20000	≤10000	≤6000
SI	≤1000	≤600	≤200
DFBHA	≥1,15	≥1,15	≥1,2

Tabelul 3.3. Valori recomandate BSR

Diametrul Ext. Prăjini Grele	Valori BSR Tradiționale	Valori BSR Recomandate
<6"	2,25-2,75	1,8-2,5
6 – 7 7/8"	2,25-2,75	2,25-2,75
≥8"	2,25-2,75	2,5-3,2

Grupe sau Clase de Proiectare [44]

Este o modalitate de simplificare a „filozofiei de proiectare”, prin gruparea limitărilor de proiectare și a coeficienților de siguranță, astfel încât proiectele să poată fi comparate, garniturile de foraj să fie alocate unor tipuri specifice de proiecte, și de asemenea inspecțiile necesare garniturilor de foraj să fie conforme cu anumite tipuri de proiecte. În tabelul 3.4 este prezentată aplicarea coeficienților de siguranță și a limitărilor de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3), iar în tabelul 3.8 sunt prezentați coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3).

Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)

Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)		
	Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	2	3

Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	>=1,15 >=1,2 <=100% >=15%	>=1 >=1,2 <=100% >=15%
Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	Tabelul 43 <=600 <=10000 <=5,5 >=1,15	Tabelul 43 <=200 <=6000 <=3,5 >=1,2
Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	Tabelul 3.5. Coeficienți și limitări de proiectare [44] (DS-1 TM Ed.3)	>=3 <=10	5 <=5

3.4. Determinarea curburii maxime pentru prăjini de foraj

Curbura maximă sau curbura critică [44] la care prăjinile de foraj pot lucra sub sarcină axială fără să intre în zona de solicitare la oboseală se poate determina aplicând ecuația Lubinsky [44]

$$C_c = \frac{D_{TJ}-D}{L^2} \cdot \frac{KL \sinh(KL)}{2-2 \cos(KL)+KL \sinh(KL)} + \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{EI(KL)^2} \quad (3.1)$$

Se definesc momentele de încovoiere în următoarele condiții:

a) Dacă $c < C_c$, atunci corpul prăjinii de foraj nu are contact cu pereții găurii de sondă curbura pereților găurii de sondă în secțiunea de studiu este mai mică decât curbura critică (curbura pentru care mijlocul lungimii corpului prăjinii de foraj să fie în contact cu pereții găurii de sondă, pentru o sarcină axială dată) și M_o este rezolvat prin ecuația [44]:

$$M_o = \frac{KL}{\tanh(KL)} [E I c - \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{EI(KL)^2}] + \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} \quad (3.2)$$

b) Dacă $c \geq C_c$, atunci corpul prăjinii de foraj este în contact cu pereții găurii de sondă și M_o (momentul de încovoiere la corpul prăjinii în zona de contact cu racordul special) este rezolvat cu ajutorul ecuației

$$M_o = \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2} + \frac{KL/2}{\tanh(KL/2)} [E I c - \frac{w_b L^2 \sin(\theta)}{(KL)^2}] + \frac{2(KL/2)^2 \tanh(KL/2)}{(\frac{KL}{2}) - \tanh(\frac{KL}{2})} \frac{EI r_c}{L^2} \quad (3.3)$$

în care:

curbura găurii de sondă (c) în secțiunea de studiu c , se calculează cu ajutorul relației

$$c = \frac{1}{R_c} \quad (3.4)$$

Termenul K se calculează cu ajutorul relației [44]

$$K = \sqrt{T/EI} \quad (3.5)$$

iar

$$r_c = (D_{TJ} - D)/2 \quad (3.15) \quad (3.6)$$

Stresul axial în corpul prăjinii se calculează cu ajutorul relației [44]

$$\sigma_a = T / A \quad (3.7)$$

Stresul rezultat din încovoiere [44]:

$$\sigma_b = \frac{D}{2I} M_o, \quad (3.8)$$

cu aria secțiunii inelare a corpului prăjinii :

$$A = 0,7854 (D^2 - d^2) \quad (3.9)$$

Ecuatiile 3.1; 3.2 și 3.3 (fără să se mai țină cont de diametrul racordurilor), se pot reformula conform API RP7G [43]:

$$C = \frac{432000}{\pi} \cdot \frac{\sigma_b}{ED} \cdot \frac{\tanh(KL)432000}{KL} \quad (3.10)$$

în care se pleacă invers, în sensul că eforturile unitare la încovoiere sunt din start limitate superior, după cum urmează:

Pentru prăjini E75 [43]:

$$\sigma_b = 19500 - 0,149 \sigma_t - 1,3 \times 10^{-6} (\sigma_t - 33500)^2 \quad (3.11)$$

cu valori adevărate până la $\sigma_t = 67000$ [psi] sau 461630 [kPa].

Pentru prăjini S135 [43]:

$$\sigma_b = 2000 (1 - \sigma_t / 145000) \quad (3.12)$$

cu valori adevărate până la 133400 [psi] sau 919126 [kPa].

Pentru Prăjini G105 [43]:

$$\sigma_b = 2000 (1 - \sigma_t / 115000) \quad (3.13)$$

cu valori adevărate până la 103000 psi sau 710000 kPa.

Forța laterală dezvoltată în racordurile speciale ale prăjinilor de foraj sub diferite valori ale curburii maxime și sub diferite valori ale sarcinii axiale se poate calcula cu ajutorul relației [44]:

$$C = \frac{10800 F}{\pi L T} \quad (3.14)$$

Se utilizează valori predeterminate ale forței laterale în racord la valori de 500; 1000; respectiv 1500 kgf, și se folosește lista următoare de termeni, notații și factori de transformare [44]

Lista de termeni, notații și factori de transformare

- | | |
|---|--|
| ○ da/dN = Rata de creștere a fisurii [inch / ciclu] | ○ M_o = Momentul de încovoiere pentru prăjina de foraj corp/racord [Lbs x ft] |
| ○ ΔK = Factorul Intensității de Stress [ksi / $\sqrt{in}$] | ○ θ = Unghiul de înclinare mediu de-a lungul corpului prăjinii de foraj [rad] |
| ○ K_{Max} = Factorul Maxim al Intensității de Stress [ksi / $\sqrt{in}$] | ○ T = Sarcina Axială [lbs] |
| ○ K_{min} = Factorul Minim al Intensității de Stress [ksi / $\sqrt{in}$] | ○ R_c = Raza de curbura a sondei coresp, unghiului θ [in] |
| ○ K_{IC} = Factorul Critic al Intensității de Stress [ksi / $\sqrt{in}$] | ○ c = Curbura găurii de sondă corespunzătoare lui R_c [in ⁻¹] |
| ○ R = Rația de Stress | ○ W_b = Greutatea unitara imersată [lbs/in] |
| ○ C = Coeficientul Forman | ○ σ_a = Stress axial [psi] |
| ○ n = Exponentul ecuației Forman | ○ σ_b = Stress de încovoiere [psi] |
| ○ a = Adâncimea fisurii [in] | |
| ○ σ_t = Încovoierea axială [ksi] | |
| ○ $\sigma_{bending}$ = Stressul de Încovoiere [ksi] | |
| ○ F = Factor de corecție a componentei geometrice | |
| ○ A = Aria Secțiunii inelare la corp prajină de foraj [in ²] | |
| ○ CI = Indicele de Curbură | |
| ○ D = Diam. Exterior corp prăjină foraj [in] | |
| ○ D_{TJ} = Diametrul exterior racord [in] | |
| ○ d = Diametrul interior prăjina foraj [in] | |
| ○ E = Modulul Young [psi] | |
| ○ I = Momentul de inerție al Diametrului ext. [in ⁴] | |
| ○ L = Jumătate lungime prăjina de foraj [in] | |
| | 1 inch = 2,54 cm |
| | 1 foot = 0,3048 m |
| | 1 foot = 12 inch |
| | 1 psi = 6,89 KPa |
| | 1 lbs x foot = 0,1356 daN x m |
| | 1° = 2π / 360 = 0,01744 rad |
| | 1 lbs = 0,448 daN |
| | 1 lbs/foot = 1,4881 Kgf / m |

Aplicându-se ecuațiile 3.13 și 3.14 au rezultat curburi admisibile în funcție de greutatea imersată a garniturii de foraj de sub curbura maximă la secțiunea de studiu, sub diferite sarcini axiale, pentru diferite diametre de prăjini de foraj. Aceste rezultate sunt grupate în tabelele 3.6 la 3.11.

Tabelul 3.6. Curbura admisibilă sub sarcini axiale pentru prăjini de foraj OD 139,7 mm

De				Di				T		σ _t		K	KL	Tanh(KL)	σ _b		c		c la 500 kg	c la 1000 kg	c la 1500 kg
in	cm	in	cm	Lbs	Kgf	psi	kgf/cm ²	-	-	-	psi	kgf/cm ²	°/100ft	°/30 m	°/30 m	°/30 m	°/30 m	°/30 m	°/30 m	°/30 m	
5,5	14	5	12	1	0,4532	0,171666	0,01207426	4,2E-05	0,007476	0,007476	20000	1406,1	19,18615	19,19	191082,8025	382165,6051	573248,408				
A				500	226,6	85,83305	6,03713099	0,00093	0,167162	0,165622	19985,1	1405,1	18,99561	19,00	382,1656051	764,3312102	1146,49682				
in ⁴	cm ⁴	in ⁴	cm ⁴	1000	453,2	171,6661	12,074262	0,00131	0,236402	0,232095	19970,1	1404	18,80881	18,81	191,0828025	382,1656051	573,248408				
5,825	37,53	19,33	804,4	5000	2266	858,3305	60,3713099	0,00294	0,528612	0,484319	19850,7	1395,6	17,44768	17,45	38,21656051	76,43312102	114,649682				
E				10000	4532	1716,661	120,74262	0,00415	0,74757	0,633697	19701,5	1385,1	16,02118	16,02	19,10828025	38,21656051	57,3248408				
	psi	3E+07		20000	9064	3433,322	241,485239	0,00587	1,057223	0,784599	19402,9	1364,2	13,81383	13,81	9,554140127	19,10828025	28,6624204				
	kgf/cm ²	2E+06		30000	13596	5149,983	362,227859	0,00719	1,294828	0,860386	19104,4	1343,2	12,17811	12,18	6,369426752	12,7388535	19,1082803				
L				40000	18128	6866,644	482,970479	0,00831	1,495139	0,904266	18805,8	1322,2	10,91121	10,91	4,777070064	9,554140127	14,3312102				
in	cm	in	cm	50000	22660	8583,305	603,713099	0,00929	1,671616	0,931765	18507,3	1301,2	9,896422	9,90	3,821656051	7,643312102	11,4649682				
180	457,2	7,25	18,42	60000	27192	10299,97	724,455718	0,01017	1,831164	0,94994	18208,7	1280,2	9,061797	9,06	3,184713376	6,369426752	9,55414013				
Q Greutate nominala lbs/ft 22 kg/m 33				70000	31724	12016,63	845,198338	0,01099	1,977883	0,962431	17910,2	1259,2	8,360549	8,36	2,729754322	5,459508644	8,18926297				
				80000	36256	13733,29	965,940958	0,01175	2,114446	0,971281	17611,6	1238,2	7,76093	7,76	2,388535032	4,777070064	7,1656051				
				90000	40788	15449,95	1086,68358	0,01246	2,242709	0,977707	17313,1	1217,2	7,240623	7,24	2,123142251	4,246284501	6,36942675				
				100000	45320	17166,61	1207,4262	0,01313	2,364023	0,982468	17014,5	1196,2	6,783477	6,78	1,910828025	3,821656051	5,73248408				
				110000	49852	18883,27	1328,16882	0,01377	2,479408	0,986055	16716	1175,2	6,377508	6,38	1,737116387	3,474232774	5,21134916				
				120000	54384	20599,93	1448,91144	0,01439	2,589657	0,988799	16417,4	1154,3	6,013632	6,01	1,592356688	3,184713376	4,77707006				
				130000	58916	22316,59	1569,65406	0,01497	2,6954	0,990925	16118,9	1133,3	5,684837	5,68	1,469867712	2,939735424	4,40960314				
				140000	63448	24033,25	1690,39668	0,01554	2,797149	0,99259	15820,3	1112,3	5,385616	5,39	1,364877161	2,729754322	4,09463148				
				150000	67980	25749,91	1811,1393	0,01609	2,895324	0,993907	15521,8	1091,3	5,111585	5,11	1,27388535	2,547770701	3,82165605				
				160000	72512	27466,58	1931,88192	0,01661	2,990278	0,994958	15223,2	1070,3	4,85921	4,86	1,194267516	2,388535032	3,58280255				
Calitate Premium				170000	77044	29183,24	2052,62454	0,01712	3,082308	0,995804	14924,7	1049,3	4,625604	4,63	1,124016486	2,248032971	3,37204946				
				180000	81576	30899,9	2173,36715	0,01762	3,171669	0,996489	14626,1	1028,3	4,408389	4,41	1,061571125	2,123142251	3,18471338				
				190000	86108	32616,56	2294,10977	0,0181	3,25858	0,997049	14327,6	1007,3	4,205586	4,21	1,005698961	2,011397922	3,01709688				
				200000	90640	34333,22	2414,85239	0,01857	3,343233	0,997508	14029	986,34	4,015531	4,02	0,955414013	1,910828025	2,86624204				
				210000	95172	36049,88	2535,59501	0,01903	3,425794	0,997887	13730,5	965,35	3,83682	3,84	0,909918107	1,819836215	2,72975432				
				220000	99704	37766,54	2656,33763	0,01948	3,506412	0,998201	13431,9	944,36	3,668252	3,67	0,868558193	1,737116387	2,60567458				
				230000	104236	39483,2	2777,08025	0,01992	3,585218	0,998463	13133,4	923,37	3,508801	3,51	0,830794794	1,661589587	2,49238438				
				240000	108768	41199,86	2897,82287	0,02035	3,662328	0,998683	12834,8	902,38	3,357578	3,36	0,796178344	1,592356688	2,38853503				
				250000	113300	42916,52	3018,56549	0,02077	3,737848	0,998867	12536,3	881,39	3,213812	3,21	0,76433121	1,52866242	2,29299363				
				260000	117832	44633,19	3139,30811	0,02118	3,811872	0,999023	12237,7	860,4	3,076832	3,08	0,734933856	1,469867712	2,20480157				
				270000	122364	46349,85	3260,05073	0,02158	3,884485	0,999155	11939,2	839,41	2,946046	2,95	0,707714084	1,415428167	2,12314225				
				280000	126896	48066,51	3380,79335	0,02198	3,955766	0,999267	11640,6	818,42	2,820936	2,82	0,682438581	1,364877161	2,04731574				
				290000	131428	49783,17	3501,53597	0,02237	4,025785	0,999363	11342,1	797,43	2,70104	2,70	0,658906216	1,317812431	1,97671865				
				300000	135960	51499,83	3622,27859	0,02275	4,094607	0,999445	11043,5	776,44	2,58595	2,59	0,636942675	1,27388535	1,91082803				
				310000	140492	53216,49	3743,02121	0,02312	4,162291	0,999515	10745	755,45	2,475302	2,48	0,616396137	1,232792275	1,84918841				
				320000	145024	54933,15	3863,76383	0,02349	4,228892	0,999576	10446,4	734,46	2,368768	2,37	0,597133758	1,194267516	1,79140127				
				330000	149556	56649,81	3984,50645	0,02386	4,29446	0,999628	10147,9	713,47	2,266056	2,27	0,579038796	1,158077591	1,73711639				
				340000	154088	58366,47	4105,24907	0,02422	4,359042	0,999673	9849,31	692,48	2,166901	2,17	0,562008243	1,124016486	1,68602473				
				350000	158620	60083,13	4225,99169	0,02457	4,422681	0,999712	9550,76	671,49	2,071065	2,07	0,545950864	1,091901729	1,63785259				
				360000	163152	61799,79	4346,73431	0,02492	4,485417	0,999746	9252,21	650,5	1,97833	1,98	0,530785563	1,061571125	1,59235669				
				370000	167684	63516,46	4467,47693	0,02526	4,547288	0,999775	8953,66	629,5	1,8885	1,89	0,516440007	1,032880014	1,54932002				
				380000	172216	65233,12	4588,21955	0,0256	4,608328	0,999801	8655,11	608,51	1,801397	1,80	0,50284948	1,005698961	1,50854844				
				390000	176748	66949,78	4708,96217	0,02594	4,66857	0,999824	8356,56	587,52	1,716855	1,72	0,489955904	0,979911808	1,46986771				
				400000	181280	68666,44	4829,70479	0,02627	4,728045	0,999844	8058,01	566,53	1,634725	1,63	0,477707006	0,955414013	1,43312102				
				410000	185812	70383,1	4950,44741	0,02659	4,786781	0,999861	7759,46	545,54	1,55487	1,55	0,466055616	0,932111232	1,39816685				
				420000	190344	72099,76	5071,19003	0,02692	4,844804	0,999876	7460,91	524,55	1,477163	1,48	0,454959054	0,909918107	1,36487716				
				430000	194876	73816,42	5191,93265	0,02723	4,902141	0,99989	7162,36	503,56	1,401486	1,40	0,444378611	0,888757221	1,33313583				
				440000	199408	75533,08	5312,67527	0,02755	4,958815	0,999901	6863,81	482,57	1,327734	1,33	0,434279097	0,868558193	1,30283729				
				450000	203940	77249,74	5433,41789	0,02786	5,014849	0,999912	6565,26	461,58	1,255806	1,26	0,42462845	0,8492569	1,27388535				
				460000	208472	78966,4	5554,16051	0,02817	5,070263	0,999921	6266,71	440,59	1,185609	1,19	0,415397397	0,830794794	1,24619219				
				470000	213004	80683,07	5674,90313	0,02847	5,125079	0,999929	5968,16	419,6	1,117058	1,12	0,406559154	0,813118309	1,21967746				
				480000	217536	82399,73	5795,64575	0,02877	5,179314	0,999937	5669,61	398,61	1,050074	1,05	0,398089172	0,796178344	1,19426752				
				490000	222068	84116,39	5916,38837	0,02907	5,232987	0,999943	5371,06	377,62	0,984583	0,98	0,389964903	0,779929806	1,16989471				
				500000	226600	85833,05	6037,13099	0,02937	5,286115	0,999949	5072,51	356,63	0,920515	0,92	0,382165605	0,76433121	1,14649682				
				510000	231132	87549,71	6157,87361	0,02966	5,338714	0,999954	4773,96	335,64	0,857806	0,86	0,374672162	0,749344324	1,12401649				
				520000	235664	89266,37	6278,61622	0,02995	5,390801	0,999958	4475,41	314,65	0,796395	0,80	0,367466928	0,734933856	1,10240048				
				530000	240196	90983,03	6399,35884	0,03024	5,442389	0,999963	4176,86	293,66									

Tabelul 3.7. Curbura admisibilă sub sarcini axiale pentru prăjini de foraj OD 127 mm

De		Di		T		σ_t		K	KL	Tanh(KL)	σ_b		c	
in	cm	in	cm	Lbs	Kgf	psi	kgf/cm ²	-	-	-	psi	kgf/cm ²	°/100 ft	°/30 m
5	13	4,3	11	1	0,4532	0,189684	0,01334157	4,8E-05	0,008702	0,008702	20000	1406,1	21,43844	21,44
A		I		500	226,6	94,84207	6,67078746	0,00108	0,194584	0,192165	19983,5	1405	21,15501	21,16
in ²	cm ²	in ⁴	cm ⁴	1000	453,2	189,6841	13,3415749	0,00153	0,275184	0,268442	19967	1403,8	20,87926	20,88
5,272	33,97	14,26	593,6	5000	2266	948,4207	66,7078746	0,00342	0,61533	0,547868	19835,1	1394,5	18,93112	18,93
E		3E+07		10000	4532	1896,841	133,415749	0,00483	0,870207	0,70148	19670,1	1382,9	16,99707	17,00
kgf/cm ²		2E+06		20000	9064	3793,683	266,831498	0,00684	1,230659	0,84277	19340,2	1359,8	14,19737	14,20
				30000	13596	5690,524	400,247247	0,00837	1,507244	0,906449	19010,3	1336,6	12,25532	12,26
L		D record		40000	18128	7587,366	533,662997	0,00967	1,740415	0,940275	18680,5	1313,4	10,81843	10,82
in	cm	in	cm	50000	22660	9484,207	667,078746	0,01081	1,945843	0,959995	18350,6	1290,2	9,704778	9,70
180	457,2	6,5	16,51	60000	27192	11381,05	800,494495	0,01184	2,131564	0,972235	18020,7	1267	8,810871	8,81
Q Greutate nominala lbs/ft 19,5 kg/m 29,02 Calitate Premium				70000	31724	13277,89	933,910244	0,01279	2,302353	0,980189	17690,8	1243,8	8,073473	8,07
				80000	36256	15174,73	1067,32599	0,01367	2,461318	0,985545	17360,9	1220,6	7,451718	7,45
				90000	40788	17071,57	1200,74174	0,0145	2,610622	0,989257	17031	1197,4	6,918005	6,92
				100000	45320	18968,41	1334,15749	0,01529	2,751838	0,991889	16701,1	1174,2	6,453	6,45
				110000	49852	20865,26	1467,57324	0,01603	2,886152	0,993794	16371,3	1151	6,042746	6,04
				120000	54384	22762,1	1600,98899	0,01675	3,014487	0,995196	16041,4	1127,8	5,676904	5,68
				130000	58916	24658,94	1734,40474	0,01743	3,137578	0,996242	15711,5	1104,6	5,347646	5,35
				140000	63448	26555,78	1867,82049	0,01809	3,256018	0,997034	15381,6	1081,4	5,048931	5,05
				150000	67980	28452,62	2001,23624	0,01872	3,370299	0,997639	15051,7	1058,2	4,776018	4,78
				160000	72512	30349,46	2134,65199	0,01934	3,48083	0,998107	14721,8	1035	4,525129	4,53
				170000	77044	32246,31	2268,06774	0,01993	3,587957	0,998472	14391,9	1011,9	4,293218	4,29
				180000	81576	34143,15	2401,48348	0,02051	3,691978	0,998758	14062,1	988,66	4,077795	4,08
				190000	86108	36039,99	2534,89923	0,02107	3,793146	0,998986	13732,2	965,47	3,876805	3,88
				200000	90640	37936,83	2668,31498	0,02162	3,891686	0,999167	13402,3	942,27	3,688538	3,69
				210000	95172	39833,67	2801,73073	0,02215	3,987792	0,999313	13072,4	919,08	3,511554	3,51
				220000	99704	41730,51	2935,14648	0,02268	4,081635	0,99943	12742,5	895,89	3,344634	3,34
				230000	104236	43627,35	3068,56223	0,02319	4,173368	0,999526	12412,6	872,7	3,186736	3,19
				240000	108768	45524,2	3201,97798	0,02368	4,263129	0,999604	12082,7	849,5	3,036967	3,04
				250000	113300	47421,04	3335,39373	0,02417	4,351037	0,999668	11752,9	826,31	2,894552	2,89
				260000	117832	49317,88	3468,80948	0,02465	4,437205	0,99972	11423	803,12	2,758819	2,76
				270000	122364	51214,72	3602,22523	0,02512	4,521731	0,999764	11093,1	779,92	2,629179	2,63
				280000	126896	53111,56	3735,64098	0,02558	4,604705	0,9998	10763,2	756,73	2,505116	2,51
				290000	131428	55008,4	3869,05672	0,02603	4,686211	0,99983	10433,3	733,54	2,386172	2,39
				300000	135960	56905,24	4002,47247	0,02648	4,766323	0,999855	10103,4	710,34	2,271944	2,27
				310000	140492	58802,09	4135,88822	0,02692	4,84511	0,999876	9773,55	687,15	2,162071	2,16
				320000	145024	60698,93	4269,30397	0,02735	4,922637	0,999894	9443,66	663,96	2,05623	2,06
				330000	149556	62595,77	4402,71972	0,02777	4,998961	0,999909	9113,78	640,76	1,954133	1,95
				340000	154088	64492,61	4536,13547	0,02819	5,074138	0,999922	8783,89	617,57	1,85552	1,86
				350000	158620	66389,45	4669,55122	0,0286	5,148217	0,999932	8454,01	594,38	1,760157	1,76
				360000	163152	68286,29	4802,96697	0,02901	5,221245	0,999942	8124,12	571,18	1,667831	1,67
				370000	167684	70183,13	4936,38272	0,02941	5,293265	0,999949	7794,24	547,99	1,578349	1,58
				380000	172216	72079,98	5069,79847	0,0298	5,364319	0,999956	7464,35	524,8	1,491535	1,49
				390000	176748	73976,82	5203,21422	0,03019	5,434444	0,999962	7134,47	501,6	1,407229	1,41
				400000	181280	75873,66	5336,62997	0,03058	5,503675	0,999967	6804,58	478,41	1,325284	1,33
				410000	185812	77770,5	5470,04571	0,03096	5,572047	0,999971	6474,7	455,22	1,245567	1,25
				420000	190344	79667,34	5603,46146	0,03133	5,639589	0,999975	6144,81	432,02	1,167952	1,17
				430000	194876	81564,18	5736,87721	0,0317	5,706332	0,999978	5814,92	408,83	1,092326	1,09
				440000	199408	83461,02	5870,29296	0,03207	5,772303	0,999981	5485,04	385,64	1,018585	1,02
				450000	203940	85357,87	6003,70871	0,03243	5,837529	0,999983	5155,15	362,44	0,94663	0,95
				460000	208472	87254,71	6137,12446	0,03279	5,902034	0,999985	4825,27	339,25	0,876371	0,88
				470000	213004	89151,55	6270,54021	0,03314	5,965842	0,999987	4495,38	316,06	0,807726	0,81
				480000	217536	91048,39	6403,95596	0,03349	6,028974	0,999988	4165,5	292,86	0,740616	0,74
				490000	222068	92945,23	6537,37171	0,03384	6,091452	0,99999	3835,61	269,67	0,67497	0,67
				500000	226600	94842,07	6670,78746	0,03418	6,153296	0,999991	3505,73	246,48	0,610719	0,61
				510000	231132	96738,92	6804,20321	0,03453	6,214524	0,999992	3175,84	223,28	0,5478	0,55
				520000	235664	98635,76	6937,61895	0,03486	6,275155	0,999993	2845,96	200,09	0,486156	0,49
				530000	240196	100532,6	7071,0347	0,0352	6,335206	0,999994	2516,07	176,9	0,42573	0,43
				540000	244728	102429,4	7204,45045	0,03553	6,394693	0,999994	2186,18	153,7	0,366471	0,37
				550000	249260	104326,3	7337,8662	0,03585	6,453631	0,999995	1856,3	130,51	0,308331	0,31

Tabelul 3.8. Curbura admisibilă sub sarcini axiale pentru prăjini de foraj OD 114,3 mm

De		Di		T		σ t		K	KL	Tanh(KL)	σ b		c	
in	cm	in	cm	Lbs	Kgf	psi	kgf/cm2	-	-	-	psi	kgf/cm2	° /100 ft	°/30 m
4,5	11	3,8	9,7	1	0,4532	0,227004	0,01596651	5,9E-05	0,010603	0,010603	20000	1406,1	23,95965	23,96
A		I		500	226,6	113,5021	7,98325693	0,00132	0,237101	0,232756	19980,3	1404,8	23,49826	23,50
in^2	cm^2	in^4	cm^2	1000	453,2	227,0043	15,9665139	0,00186	0,335312	0,323286	19960,5	1403,4	23,05563	23,06
4,405	28,38	9,606	399,8	5000	2266	1135,021	79,8325693	0,00417	0,74978	0,635018	19802,6	1392,3	20,09286	20,09
E	psi	3E+07		10000	4532	2270,043	159,665139	0,00589	1,06035	0,785798	19605,2	1378,4	17,40607	17,41
	kgf/cm^2	2E+06		20000	9064	4540,086	319,330277	0,00833	1,499561	0,905069	19210,4	1350,6	13,89063	13,89
				30000	13596	6810,128	478,995416	0,0102	1,83658	0,950466	18815,6	1322,9	11,66576	11,67
L		D racord		40000	18128	9080,171	638,660554	0,01178	2,120699	0,971633	18420,8	1295,1	10,11114	10,11
in	cm	in	cm	50000	22660	11350,21	798,325693	0,01317	2,371014	0,982709	18026	1267,4	8,950741	8,95
180	457,2	6,37	16,18	60000	27192	13620,26	957,990831	0,01443	2,597316	0,988969	17631,3	1239,6	8,042828	8,04
Q Greutate nominala lbs/ft 17 kg/m 25				70000	31724	15890,3	1117,65597	0,01559	2,805422	0,992711	17236,5	1211,8	7,307024	7,31
				80000	36256	18160,34	1277,32111	0,01666	2,999122	0,995046	16841,7	1184,1	6,694253	6,69
				90000	40788	20430,38	1436,98625	0,01767	3,181049	0,996554	16446,9	1156,3	6,172798	6,17
				100000	45320	22700,43	1596,65139	0,01863	3,35312	0,997556	16052,1	1128,6	5,72121	5,72
				110000	49852	24970,47	1756,31652	0,01954	3,516782	0,998238	15657,3	1100,8	5,324433	5,32
				120000	54384	27240,51	1915,98166	0,02041	3,673159	0,998711	15262,5	1073,1	4,971574	4,97
				130000	58916	29510,56	2075,6468	0,02124	3,823145	0,999045	14867,7	1045,3	4,654537	4,65
				140000	63448	31780,6	2235,31194	0,02204	3,967465	0,999284	14472,9	1017,5	4,367172	4,37
				150000	67980	34050,64	2394,97708	0,02282	4,106717	0,999458	14078,1	989,79	4,104716	4,10
				160000	72512	36320,68	2554,64222	0,02356	4,241399	0,999586	13683,4	962,04	3,863416	3,86
Calitate	Premium	170000	77044	38590,73	2714,30736	0,02429	4,371934	0,999681	13288,6	934,28	3,640272	3,64		
		180000	81576	40860,77	2873,97249	0,02499	4,498683	0,999753	12893,8	906,52	3,432852	3,43		
				190000	86108	43130,81	3033,63763	0,02568	4,621957	0,999807	12499	878,77	3,239162	3,24
				200000	90640	45400,86	3193,30277	0,02634	4,742028	0,999848	12104,2	851,01	3,05755	3,06
				210000	95172	47670,9	3352,96791	0,027	4,859133	0,99988	11709,4	823,25	2,886633	2,89
				220000	99704	49940,94	3512,63305	0,02763	4,973481	0,999904	11314,6	795,5	2,725245	2,73
				230000	104236	52210,98	3672,29819	0,02825	5,085259	0,999923	10919,8	767,74	2,572392	2,57
				240000	108768	54481,03	3831,96333	0,02886	5,194632	0,999938	10525	739,98	2,427224	2,43
				250000	113300	56751,07	3991,62846	0,02945	5,301749	0,99995	10130,2	712,23	2,289007	2,29
				260000	117832	59021,11	4151,2936	0,03004	5,406744	0,99996	9735,46	684,47	2,157103	2,16
				270000	122364	61291,15	4310,95874	0,03061	5,509739	0,999967	9340,67	656,71	2,030955	2,03
				280000	126896	63561,2	4470,62388	0,03117	5,610843	0,999973	8945,88	628,96	1,910077	1,91
				290000	131428	65831,24	4630,28902	0,03172	5,710158	0,999978	8551,09	601,2	1,794037	1,79
				300000	135960	68101,28	4789,95416	0,03227	5,807775	0,999982	8156,3	573,44	1,682454	1,68
				310000	140492	70371,33	4949,61929	0,0328	5,903777	0,999985	7761,51	545,69	1,574988	1,57
				320000	145024	72641,37	5109,28443	0,03332	5,998244	0,999988	7366,72	517,93	1,471337	1,47
				330000	149556	74911,41	5268,94957	0,03384	6,091246	0,99999	6971,93	490,18	1,371229	1,37
				340000	154088	77181,45	5428,61471	0,03435	6,182848	0,999991	6577,14	462,42	1,274419	1,27
				350000	158620	79451,5	5588,27985	0,03485	6,273114	0,999993	6182,35	434,66	1,180687	1,18
				360000	163152	81721,54	5747,94499	0,03534	6,362098	0,999994	5787,56	406,91	1,089833	1,09
				370000	167684	83991,58	5907,61013	0,03583	6,449856	0,999995	5392,77	379,15	1,001676	1,00
				380000	172216	86261,63	6067,27526	0,03631	6,536435	0,999996	4997,98	351,39	0,91605	0,92
				390000	176748	88531,67	6226,9404	0,03679	6,621882	0,999996	4603,19	323,64	0,832805	0,83
				400000	181280	90801,71	6386,60554	0,03726	6,706241	0,999997	4208,4	295,88	0,751803	0,75
				410000	185812	93071,75	6546,27068	0,03772	6,789551	0,999997	3813,61	268,12	0,672917	0,67
				420000	190344	95341,8	6705,93582	0,03818	6,871852	0,999998	3418,82	240,37	0,596031	0,60
				430000	194876	97611,84	6865,60096	0,03863	6,953178	0,999998	3024,03	212,61	0,521038	0,52
				440000	199408	99881,88	7025,2661	0,03908	7,033564	0,999998	2629,24	184,85	0,447838	0,45
				450000	203940	102151,9	7184,93123	0,03952	7,113042	0,999999	2234,45	157,1	0,376341	0,38
				460000	208472	104422	7344,59637	0,03995	7,191642	0,999999	1839,66	129,34	0,306462	0,31

Tabelul 3.9. Curbura admisibilă sub sarcini axiale pentru prăjini de foraj OD 101,6 mm

De		Di		T		σ_t		K	KL	Tanh(KL)	σ_b		c	
in	cm	in	cm	Lbs	Kgf	psi	kgf/cm ²	-	-	-	psi	kgf/cm ²	°/100 ft	°/30 m
4	10	3,3	8,5	1	0,4532	0,26296	0,01849551	7,2E-05	0,012936	0,012935	20000	1406,1	27,44549	27,45
A		I		500	226,6	131,4802	9,2477571	0,00161	0,289249	0,281444	19977,1	1404,5	26,67587	26,68
in ²	cm ²	in ⁴	cm ⁴	1000	453,2	262,9604	18,4955142	0,00227	0,40906	0,387675	19954,3	1402,9	25,95266	25,95
3,803	24,5	6,454	268,6	5000	2266	1314,802	92,477571	0,00508	0,914687	0,723374	19771,3	1390,1	21,45818	21,46
E		psi		10000	4532	2629,604	184,955142	0,00719	1,293562	0,860057	19542,7	1374	17,83158	17,83
		kgf/cm²		20000	9064	5259,208	369,910284	0,01016	1,829373	0,949765	19085,4	1341,8	13,59816	13,60
		3E+07		30000	13596	7888,812	554,865426	0,01245	2,240516	0,97761	18628	1309,7	11,15452	11,15
		2E+06		40000	18128	10518,42	739,820568	0,01437	2,587125	0,988743	18170,7	1277,5	9,530245	9,53
L		D record		50000	22660	13148,02	924,77571	0,01607	2,892493	0,993872	17713,4	1245,4	8,352682	8,35
in	cm	in	cm	60000	27192	15777,62	1109,73085	0,0176	3,168568	0,996468	17256,1	1213,2	7,447459	7,45
180	457,2	5,5	13,97	70000	31724	18407,23	1294,68599	0,01901	3,422444	0,997872	16798,7	1181,1	6,721739	6,72
Q Greutate nominala lbs/ft 14 kg/m 21 Calitate Premium				80000	36256	21036,83	1479,64114	0,02033	3,658747	0,998673	16341,4	1148,9	6,121347	6,12
				90000	40788	23666,44	1664,59628	0,02156	3,880687	0,999149	15884,1	1116,8	5,612421	5,61
				100000	45320	26296,04	1849,55142	0,02273	4,090603	0,99944	15426,8	1084,6	5,172624	5,17
				110000	49852	28925,64	2034,50656	0,02383	4,290261	0,999625	14969,5	1052,5	4,78658	4,79
				120000	54384	31555,25	2219,4617	0,02489	4,481031	0,999744	14512,1	1020,3	4,443325	4,44
				130000	58916	34184,85	2404,41685	0,02591	4,664005	0,999822	14054,8	988,15	4,134803	4,13
				140000	63448	36814,46	2589,37199	0,02689	4,840067	0,999875	13597,5	956	3,854953	3,85
				150000	67980	39444,06	2774,32713	0,02783	5,009945	0,999911	13140,2	923,85	3,599111	3,60
				160000	72512	42073,66	2959,28227	0,02875	5,174249	0,999936	12682,8	891,69	3,363625	3,36
				170000	77044	44703,27	3144,23741	0,02963	5,333494	0,999953	12225,5	859,54	3,145585	3,15
				180000	81576	47332,87	3329,19256	0,03049	5,48812	0,999966	11768,2	827,39	2,942643	2,94
				190000	86108	49962,48	3514,1477	0,03133	5,638507	0,999975	11310,9	795,23	2,752879	2,75
				200000	90640	52592,08	3699,10284	0,03214	5,784986	0,999981	10853,6	763,08	2,574705	2,57
				210000	95172	55221,68	3884,05798	0,03293	5,927847	0,999986	10396,2	730,93	2,406794	2,41
				220000	99704	57851,29	4069,01312	0,03371	6,067345	0,999989	9938,91	698,77	2,248026	2,25
				230000	104236	60480,89	4253,96827	0,03447	6,203707	0,999992	9481,58	666,62	2,097453	2,10
				240000	108768	63110,5	4438,92341	0,03521	6,337135	0,999994	9024,26	634,47	1,954259	1,95
				250000	113300	65740,1	4623,87855	0,03593	6,467811	0,999995	8566,94	602,32	1,817743	1,82
				260000	117832	68369,7	4808,83369	0,03664	6,595899	0,999996	8109,62	570,16	1,687294	1,69
				270000	122364	70999,31	4993,78883	0,03734	6,721547	0,999997	7652,29	538,01	1,562382	1,56
				280000	126896	73628,91	5178,74398	0,03803	6,844888	0,999998	7194,97	505,86	1,44254	1,44
				290000	131428	76258,52	5363,69912	0,0387	6,966046	0,999998	6737,65	473,7	1,327356	1,33
				300000	135960	78888,12	5548,65426	0,03936	7,085132	0,999999	6280,33	441,55	1,216466	1,22
				310000	140492	81517,72	5733,6094	0,04001	7,20225	0,999999	5823	409,4	1,109544	1,11
				320000	145024	84147,33	5918,56454	0,04065	7,317493	0,999999	5365,68	377,25	1,006302	1,01
				330000	149556	86776,93	6103,51969	0,04128	7,43095	0,999999	4908,36	345,09	0,906479	0,91
				340000	154088	89406,54	6288,47483	0,0419	7,542699	0,999999	4451,04	312,94	0,809842	0,81
				350000	158620	92036,14	6473,42997	0,04252	7,652818	1	3993,71	280,79	0,716179	0,72
				360000	163152	94665,74	6658,38511	0,04312	7,761374	1	3536,39	248,63	0,625299	0,63
				370000	167684	97295,35	6843,34025	0,04371	7,868432	1	3079,07	216,48	0,537029	0,54
				380000	172216	99924,95	7028,2954	0,0443	7,974053	1	2621,75	184,33	0,451209	0,45
				390000	176748	102554,6	7213,25054	0,04488	8,078294	1	2164,43	152,17	0,367696	0,37

Tabelul 3.10. Curbura admisibilă sub sarcini axiale pentru prăjini de foraj OD 88,9 mm

De		Di		T		σ_t		K	KL	Tanh(KL)	σ_b		c	
in	cm	in	cm	Lbs	Kgf	psi	kgf/cm ²	-	-	-	psi	kgf/cm ²	°/100 ft	°/30 m
3,5	8,9	2,8	7,1	1	0,4532	0,280492	0,01972864	8,7E-05	0,015584	0,015582	20000	1406,1	33,01599	33,02
A		I		500	226,6	140,2462	9,86432194	0,00194	0,348461	0,33501	19975,6	1404,4	31,70547	31,71
in ²	cm ²	in ⁴	cm ⁴	1000	453,2	280,4924	19,7286439	0,00274	0,492799	0,456435	19951,2	1402,7	30,50769	30,51
3,565	22,97	4,447	185,1	5000	2266	1402,462	98,6432194	0,00612	1,101932	0,801192	19756,1	1389	23,71447	23,71
E		3E+07		10000	4532	2804,924	197,286439	0,00866	1,558367	0,915155	19512,2	1371,8	18,91741	18,92
kgf/cm ²		2E+06		20000	9064	5609,849	394,572877	0,01224	2,203863	0,975928	19024,4	1337,5	13,9083	13,91
L		Dracord		30000	13596	8414,773	591,859316	0,015	2,69917	0,990993	18536,6	1303,3	11,23569	11,24
in	cm	in	cm	40000	18128	11219,7	789,145755	0,01732	3,116733	0,996082	18048,7	1269	9,52299	9,52
180	457,2	5	12,7	50000	22660	14024,62	986,432194	0,01936	3,484614	0,998121	17560,9	1234,7	8,304372	8,30
Q Greutate nominala lbs/ft 13 kg/m 20 Calitate Premium				60000	27192	16829,55	1183,71863	0,02121	3,817203	0,999033	17073,1	1200,4	7,376975	7,38
				70000	31724	19634,47	1381,00507	0,02291	4,12305	0,999476	16585,3	1166,1	6,637548	6,64
				80000	36256	22439,4	1578,29151	0,02449	4,407726	0,999703	16097,5	1131,8	6,027613	6,03
				90000	40788	25244,32	1775,57795	0,02597	4,6751	0,999826	15609,7	1097,5	5,511354	5,51
				100000	45320	28049,24	1972,86439	0,02738	4,927988	0,999895	15121,9	1063,2	5,065484	5,07
				110000	49852	30854,17	2170,15083	0,02871	5,168517	0,999935	14634,1	1028,9	4,674135	4,67
				120000	54384	33659,09	2367,43726	0,02999	5,39834	0,999959	14146,2	994,58	4,326072	4,33
				130000	58916	36464,02	2564,7237	0,03122	5,618771	0,999974	13658,4	960,28	4,013088	4,01
				140000	63448	39268,94	2762,01014	0,03239	5,830874	0,999983	13170,6	925,99	3,729028	3,73
				150000	67980	42073,87	2959,29658	0,03353	6,035528	0,999989	12682,8	891,69	3,469171	3,47
				160000	72512	44878,79	3156,58302	0,03463	6,233466	0,999992	12195	857,39	3,229826	3,23
				170000	77044	47683,72	3353,86946	0,0357	6,42531	0,999995	11707,2	823,1	3,00806	3,01
				180000	81576	50488,64	3551,1559	0,03673	6,611589	0,999996	11219,4	788,8	2,801506	2,80
				190000	86108	53293,56	3748,44234	0,03774	6,792762	0,999997	10731,6	754,5	2,608229	2,61
				200000	90640	56098,49	3945,72877	0,03872	6,969227	0,999998	10243,7	720,21	2,426631	2,43
				210000	95172	58903,41	4143,01521	0,03967	7,141333	0,999999	9755,93	685,91	2,25378	2,26
				220000	99704	61708,34	4340,30165	0,04061	7,309387	0,999999	9268,12	651,61	2,093344	2,09
				230000	104236	64513,26	4537,58809	0,04152	7,473664	0,999999	8780,3	617,32	1,939575	1,94
				240000	108768	67318,19	4734,87453	0,04241	7,634406	1	8292,49	583,02	1,793247	1,79
				250000	113300	70123,11	4932,16097	0,04329	7,791833	1	7804,68	548,72	1,653658	1,65
				260000	117832	72928,04	5129,44741	0,04415	7,946142	1	7316,86	514,43	1,520194	1,52
				270000	122364	75732,96	5326,73385	0,04499	8,09751	1	6829,05	480,13	1,392321	1,39
				280000	126896	78537,89	5524,02028	0,04581	8,246101	1	6341,24	445,83	1,269568	1,27
				290000	131428	81342,81	5721,30672	0,04662	8,392061	1	5853,42	411,54	1,151521	1,15
				300000	135960	84147,73	5918,59316	0,04742	8,535525	1	5365,61	377,24	1,037814	1,04
				310000	140492	86952,66	6115,8796	0,0482	8,676618	1	4877,8	342,94	0,92812	0,93
				320000	145024	89757,58	6313,16604	0,04897	8,815453	1	4389,99	308,65	0,822146	0,82
				330000	149556	92562,51	6510,45248	0,04973	8,952134	1	3902,17	274,35	0,719632	0,72
				340000	154088	95367,43	6707,73892	0,05048	9,086761	1	3414,36	240,05	0,620341	0,62
				350000	158620	98172,36	6905,02536	0,05122	9,219421	1	2926,55	205,76	0,524062	0,52
				360000	163152	100977,3	7102,31179	0,05195	9,350199	1	2438,73	171,46	0,4306	0,43
				370000	167684	103782,2	7299,59823	0,05266	9,479174	1	1950,92	137,16	0,339781	0,34

Tabelul 3.11. Curbura admisibilă sub sarcini axiale pentru prăjini de foraj OD 73 mm

De		Di		T		σ t		K	KL	Tanh(KL)	σ b		c	
in	cm	in	cm	Lbs	Kgf	psi	kgf/cm ²				psi	kgf/cm ²	° /100 ft	°/30 m
2,9	7,3	2,2	5,5	1	0,4532	0,350082	0,02462325	0,00012	0,021662	0,021658	19999,9	1406,1	42,6121	42,61
A		I		500	226,6	175,0408	12,3116244	0,00269	0,484367	0,449734	19969,6	1404	39,51137	39,51
in ²	cm ²	in ⁴	cm ⁴	1000	453,2	350,0816	24,6232489	0,00381	0,684998	0,594759	19939,1	1401,9	36,8918	36,89
2,856	18,41	2,302	95,8	5000	2266	1750,408	123,116244	0,00851	1,531702	0,910715	19695,6	1384,7	24,95453	24,95
E		3E+07		10000	4532	3500,816	246,232489	0,01203	2,166153	0,974066	19391,2	1363,3	18,58127	18,58
kgf/cm ²		2E+06		20000	9064	7001,632	492,464978	0,01702	3,063403	0,995642	18782,3	1320,5	13,00831	13,01
L		Dracord		30000	13596	10502,45	738,697467	0,02084	3,751888	0,998899	18173,5	1277,7	10,31056	10,31
in	cm	in	cm	40000	18128	14003,26	984,929955	0,02407	4,332307	0,999655	17564,6	1234,9	8,636596	8,64
180	457,2	4,12	10,46	50000	22660	17504,08	1231,16244	0,02691	4,843666	0,999876	16955,8	1192,1	7,458692	7,46
Q Greutate nominala lbs/ft 10 kg/m 15				60000	27192	21004,9	1477,39493	0,02948	5,30597	0,999951	16347	1149,3	6,564829	6,56
				70000	31724	24505,71	1723,62742	0,03184	5,731103	0,999979	15738,1	1106,5	5,851648	5,85
				80000	36256	28006,53	1969,85991	0,03404	6,126807	0,99999	15129,3	1063,7	5,262022	5,26
				90000	40788	31507,34	2216,0924	0,0361	6,49846	0,999995	14520,5	1020,9	4,761461	4,76
				100000	45320	35008,16	2462,32489	0,03806	6,849978	0,999998	13911,6	978,08	4,327727	4,33
				110000	49852	38508,98	2708,55738	0,03991	7,184318	0,999999	13302,8	935,28	3,945743	3,95
				120000	54384	42009,79	2954,78987	0,04169	7,503775	0,999999	12693,9	892,47	3,604864	3,60
				130000	58916	45510,61	3201,02235	0,04339	7,810177	1	12085,1	849,67	3,297326	3,30
				140000	63448	49011,42	3447,25484	0,04503	8,105004	1	11476,3	806,86	3,017309	3,02
				150000	67980	52512,24	3693,48733	0,04661	8,389476	1	10867,4	764,06	2,760352	2,76
				160000	72512	56013,06	3939,71982	0,04814	8,664613	1	10258,6	721,25	2,522964	2,52
				170000	77044	59513,87	4185,95231	0,04962	8,931279	1	9649,76	678,45	2,30237	2,30
				180000	81576	63014,69	4432,1848	0,05106	9,19021	1	9040,92	635,64	2,09633	2,10
				190000	86108	66515,51	4678,41729	0,05246	9,442043	1	8432,09	592,83	1,903011	1,90
				200000	90640	70016,32	4924,64978	0,05382	9,687332	1	7823,25	550,03	1,720898	1,72
				210000	95172	73517,14	5170,88227	0,05515	9,926562	1	7214,41	507,22	1,548725	1,55
				220000	99704	77017,95	5417,11475	0,05645	10,16016	1	6605,57	464,42	1,385422	1,39
230000	104236	80518,77	5663,34724	0,05771	10,38851	1	5996,74	421,61	1,230082	1,23				
240000	108768	84019,59	5909,57973	0,05896	10,61194	1	5387,9	378,81	1,081924	1,08				
250000	113300	87520,4	6155,81222	0,06017	10,83077	1	4779,06	336	0,940276	0,94				
260000	117832	91021,22	6402,04471	0,06136	11,04526	1	4170,22	293,2	0,804555	0,80				
270000	122364	94522,03	6648,2772	0,06253	11,25566	1	3561,39	250,39	0,674249	0,67				
280000	126896	98022,85	6894,50969	0,06368	11,46221	1	2952,55	207,58	0,54891	0,55				
290000	131428	101523,7	7140,74218	0,06481	11,66509	1	2343,71	164,78	0,428142	0,43				

în figura 3.4, respectiv valorile intensităților maxime de deviere așa încât forțele laterale din racorduri sa fie situate între 500 și 1500 daN ca în figura 3.5.

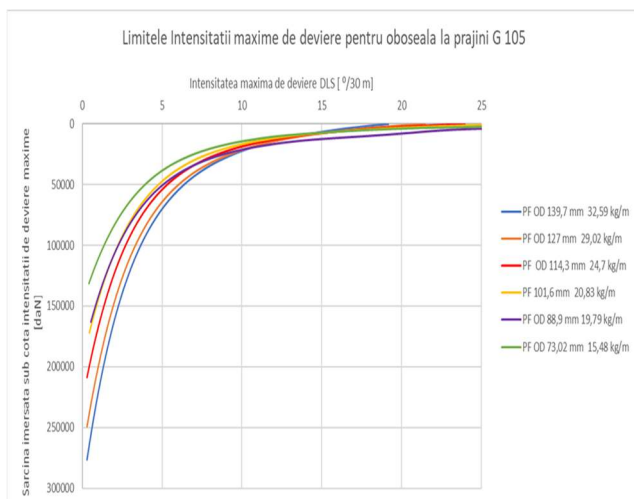


Fig. 3.4. Limitele intensității maxime de deviere pentru oboseală la prăjini G105.

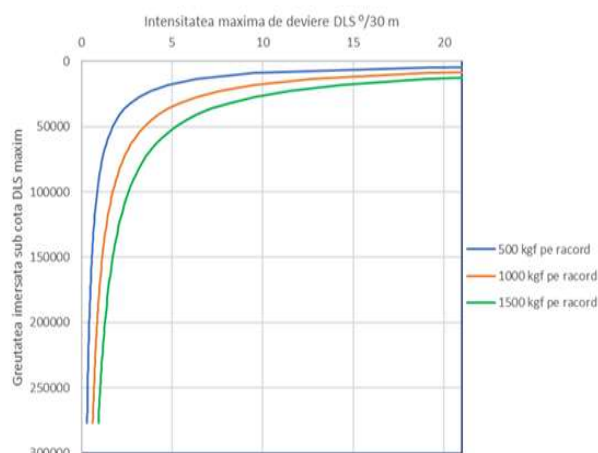


Fig. 3.5. Forța laterală în racordurile speciale

Notă. Dacă prăjinile de foraj lucrează într-un mediu coroziv atunci valorile sarcinii axiale din diagrama din figura 3.4 pot descrește cu până la 40% [43].

4.

Analiza forțelor axiale, a stării de flambaj și a momentelor de torsiune din garnitura de foraj

4.1 Analiza forțelor axiale

Analiza forțelor de frecare, a stării de flambaj și a momentelor de torsiune (*Torque and Drag analysis*) care se dezvoltă relativ la garnitura de foraj în cursul forajului sau în cursul diferitor operațiuni care se execută la sondă : marș, manevre, rotire deasupra tăpii, foraj direcțional (*sliding*), este definitorie atât pentru integritatea proiectării sondei cât și pentru eficiența și securitatea executării operațiunilor de foraj.

Această analiza evidențiază încărcarea garniturii de foraj cu forțe axiale, normale / laterale de la cota 0 până la talpa sondei, în funcție de traiectul găurii de sondă.

Din această analiză, în afara forțelor cu care este încărcată garnitura de foraj, se determină și dacă garnitura de material tubular este în stadiu de flambaj, valorile forțelor care determina flambajul, punctul /punctele neutre, valorile forțelor laterale în racorduri, forțe care determină în fapt uzura burlanelor tubate. Analiza *Torque and Drag* este extrem de importantă atât în faza de proiectare cât și în faza de execuție mai ales pentru sondele de tip ERD, sonde multilaterale, sonde orizontale, sonde de profil “J” sau “S” cu deplasări mari:

În faza de proiectare:

- Determinarea, în avans, a forțelor axiale maxime și a momentelor de torsiune maxime care se vor dezvolta în garnitura de foraj

(în coloana de burlane, tubing) în timpul unor faze specifice de lucru la sondă;

- Dimensionarea materialului tubular și a racordurilor (conexiunilor) ce se vor utiliza pentru forajul și completarea sondei (din punct

de vedere al tracțiunii și torsiunii);

- Dimensionarea instalației de foraj care va fi utilizată pentru forajul sondei în discuție;

În faza de execuție:

- Compararea încărcării garniturii de foraj / material tubular actuală cu cea proiectată;

- Estimarea coeficienților de frecare în coloană și gaură liberă;

- Verificarea din punct de vedere a tracțiunii și torsiunii pentru unele dispozitive care se vor introduce și monta în sonda respectivă, linere , cu agățatoarele și lansatoarele necesare, pakere, diferite valve de circulație , diferite tipuri de racorduri și conexiuni pentru materialul tubular. Modelul de bază *Torque – Drag* include ecuații care au fost dezvoltate de Aadony et all (2009) [45], avînd la bază modelul de garnitură de foraj “ moale” (*soft model*), conceput în care garnitura de foraj se comportă în gaura de sondă ca un cablu, așa încât tensiunea axiala este suportată de garnitura de foraj iar forțele de contact sunt suportate de pereții găurii de sondă. În orice tip de modelare, gaura de sondă se împarte în porțiuni drepte (verticale, înclinate tangente) și porțiuni curbe (creștere/scădere de înclinare respectiv azimut).

Pentru a înțelege mai bine modelul matematic, se va rula un exercițiu practic de proiectare, după cum urmează:
Fie sonda de studiu WP1A [46] care se caracterizează prin datele de traiectorie obținute prin calculare cu metoda curburii minime, [31] conform tabelului 4.1.

Tabelul 4.1. Parametrii traectului proiectat sondei WP1A [46]

PROIECTAT				(Date calculate)		
#	MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	ω/30 m
1	0	0	0	0,0	0	0
2	2650	0,0	0	2650,0	0,0	0,0
3	2670	3,25	67,9	2670,0	0,3	3,2
4	2730	21,25	67,9	2728,4	5,3	9,0
5	2760	30,25	67,9	2755,4	10,4	9,0
6	2790	39,25	67,9	2780,0	17,1	9,0
7	2820	48,25	67,9	2801,6	25,2	9,0
8	2830	51,49	67,9	2808,1	28,2	9,7
9	2850	53	67,9	2820,1	34,5	2,3
10	2880	55	67,9	2837,3	44,1	2,0
11	2910	56,23	67,9	2854,2	53,8	1,2
12	2940	68	67,9	2868,2	64,2	11,8
13	2970	68,23	67,9	2879,3	75,1	0,2
14	3000	74,23	67,9	2888,9	86,3	6,0
15	3030	80,23	67,9	2895,6	97,7	6,0
16	3060	86,23	67,9	2899,1	109,4	6,0
17	3090	90	66,42	2900,1	121,5	6,0
18	3120	90	62,42	2900,1	134,9	4,0
19	3150	90	58,42	2900,1	150,1	4,0
20	3180	90	54,42	2900,1	167,2	4,0
21	3210	90	50,42	2900,1	185,9	4,0
22	3240	90	46,42	2900,1	206,1	4,0
23	3270	90	42,42	2900,1	227,9	3,8
24	3300	90	38,42	2900,1	251,1	4,0
25	3330	90	34,42	2900,1	275,5	4,0
26	3360	90	30,42	2900,1	301,1	4,0
27	3390	90	26,42	2900,1	327,7	4,0
28	3420	90	22,42	2900,1	355,3	4,0
29	3450	90	18,42	2900,0	383,6	4,0
30	3480	90	14,42	2899,9	412,5	4,0
31	3510	90	10,42	2899,7	441,9	4,0
32	3540	90	6,43	2899,4	471,6	4,0
33	3570	90	2,43	2899,1	501,6	4,0
34	3600	90	0	2898,6	531,6	2,4
35	3630	90	0	2898,2	561,6	0,0
36	3660	90	0	2897,8	591,6	0,0
37	3690	90	0	2897,3	621,6	0,0
38	3720	90	0	2896,9	651,6	0,0
39	3750	90	0	2896,5	681,6	0,0
40	3780	90	0	2896,0	711,6	0,0
41	3810	90	0	2895,6	741,5	0,0
42	3840	90	0	2895,1	771,5	0,0
43	3870	90	0	2894,7	801,5	0,0
44	3900	90	0	2894,7	801,5	0,0
45	3930	90	0	2894,3	831,5	0,0
46	3960	90	0	2893,8	861,5	0,0
47	3990	90	0	2893,4	891,5	0,0
48	4020	90	0	2892,9	921,5	0,0
49	4050	90	0	2892,5	951,5	0,0
50	4080	90	0	2892,1	981,5	0,0
51	4110	90	0	2891,6	1011,5	0,0
52	4140	90	0	2891,2	1041,5	0,0
53	4170	90	0	2890,7	1071,5	0,0
54	4200	90	0	2890,3	1101,5	0,0
55	4230	90	0	2889,9	1131,5	0,0
56	4260	90	0	2889,4	1161,5	0,0
57	4290	90	0	2889,0	1191,5	0,0
58	4320	90	0	2888,5	1221,5	0,0
59	4350	90	0	2888,1	1251,5	0,0
60	4380	90	0	2887,7	1281,5	0,0
61	4410	90	0	2887,2	1311,5	0,0
62	4440	90	0	2886,8	1341,5	0,0
63	4470	90	0	2886,3	1371,4	0,0
64	4500	90	0	2885,9	1401,4	0,0
65	4530	90	0	2885,5	1431,4	0,0
66	4560	90	0	2885,0	1461,4	0,0
67	4590	90	0	2884,6	1491,4	0,0
68	4620	90	0	2884,1	1521,4	0,0

69	4650	90	0	2883,7	1551,4	0,0
70	4680	90	0	2883,3	1581,4	0,0
71	4710	90	0	2882,8	1611,4	0,0
72	4740	90	0	2882,4	1641,4	0,0
73	4770	90	0	2881,9	1671,4	0,0
74	4800	90	0	2881,5	1701,4	0,0
75	4830	90	0	2881,1	1731,4	0,0
76	4860	90	0	2880,6	1761,4	0,0
77	4890	90	0	2880,2	1847,1	0,0
78	4920	90	0	2879,7	1821,3	0,0
79	4950	90	0	2879,3	1851,3	0,0
80	4980	90	0	2878,9	1881,3	0,0
81	5010	90	0	2878,4	1911,3	0,0
82	5040	90	0	2878,0	1941,3	0,0
83	5070	90	0	2877,5	1971,3	0,0
84	5100	90	0	2877,1	2001,3	0,0
85	5130	90	0	2876,7	2031,3	0,0
86	5160	90	0	2876,2	2061,3	0,0
87	5190	90	0	2875,8	2091,3	0,0
88	5220	90	0	2875,4	2121,3	0,0
89	5250	90	0	2874,9	2151,3	0,0
90	5280	90	0	2874,5	2181,3	0,0
91	5310	90	0	2874,0	2211,3	0,0
92	5340	90	0	2873,6	2241,3	0,0
93	5370	90	0	2873,2	2271,2	0,0
94	5400	90	0	2873,6	2241,3	0,0
95	5430	90	0	2873,2	2271,2	0,0
96	5440	90	0	2872,7	2301,2	0,0
97	5450	90	0	2872,3	2331,2	0,0
98	5460	90	0	2872,3	2331,2	0,0

Proiecția verticală și orizontală a traiectului proiectat a sondei WP1 A este redată în figura 4.1. și 4.2

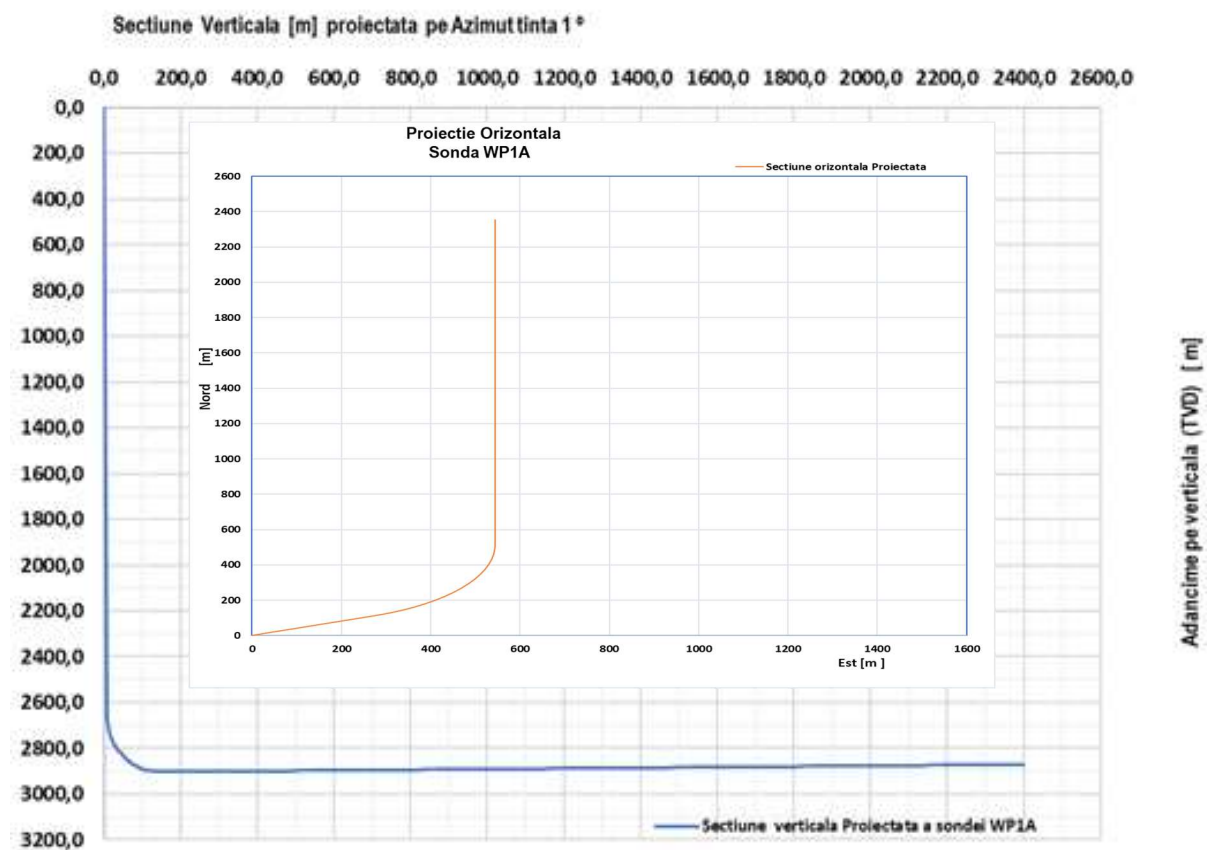


Fig. 4.1. & 4.2 Proiecția verticală & orizontală a traiectului proiectat a sondei WP1 A

Sonda prezintă o variație a intensității de deviere (DLS) ca în figura 4.3 [46].

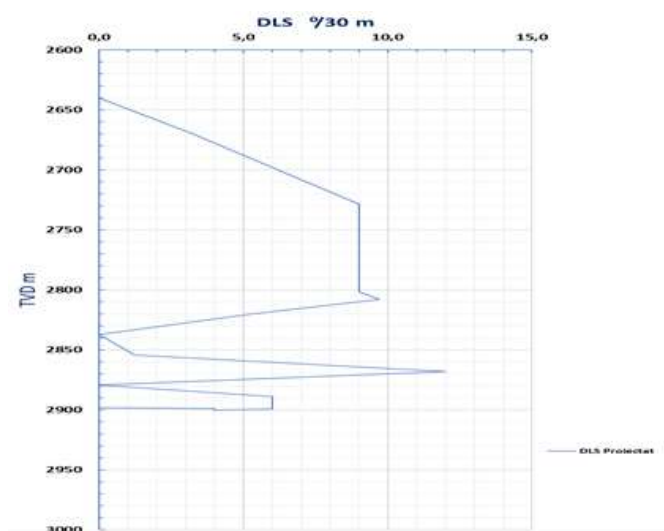


Fig. 4.3. Variația intensității de deviere (DLS) de-a lungul traiectului sondei WP1A

Datele tehnice ale sondei, respectiv, ultima coloană turbată, diametrul de foraj a găurii de producție, densitatea curentă a fluidului de foraj și adâncimea de inițiere a înclinării sînt prezentate în tabelul 4.2.

Tabelul 4.2. Date tehnice sonda WP1A

DATE SONDA WP1 A							
MD [m]	5460						
TVD [m]	2872,3						
KOP [m]	2670						
Ultima coloana P110	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]					
@ 3060 / 2899 m MD/TVD	177,8	7	157,1	6,125			
Diametrul de Foraj	155,57 [mm]	6,125 [inch]					
Densitate fluid foraj	1,2 Kg/dm3						

Pentru forajul găurii de producție este propusă spre verificare următoarea garnitură de foraj inclusiv ansamblul de fund (BHA) redat explicit în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. Garnitura de foraj și ansamblul de fund (BHA) propus pentru săparea găurii de producție in sonda WP1A

BHA si Garnitura de foraj propusa de la sapa catre suprafata							
PDM	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]	M/Up Tq.	w Corectat		Tensiune	
	120,65 4,75	44,45 1 3/4	3200	60	[Kg/m]	20000 daN	
NMDC	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]	M/Up Tq.	w Corectat		220000 daN	
	120,65 4,75	38,1 1,50	3200	80,80	[Kg/m]		
MWD/LWD	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]	M/Up Tq.	w Corectat		27000 daN	
	120,65 4,75	57,15 2,25	3200	69,60	[Kg/m]		
PF1 S135 Noi	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]		w Corectat			
	101,6 4	82,29 3,24		26,6	[Kg/m]	261000 daN	
Racord HT40	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]	M/Up Tq.				
	133,35 5,25	65,02 2,56	5406	[daN x m]			
HWDP Premium	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]		w Corectat			
	101,6 4	65,1 2 9/16		46	[Kg/m]	181000 daN	
Racord HT 40	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]	M/Up Tq.				
	133,4 5,25	65,02 2,56	5405	[daN x m]			
PF2 S135 Noi Corp	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]		w Corectat			
	101,6 4	82,29 3,24		26,6	[Kg/m]	261000 daN	
Racord HT40	OD [mm] [inch]	ID [mm] [inch]	M/Up Tq.				
	133,35 5,25	65,02 2,56	5406	[daN x m]			

Notă: Proiectantul trebuie să-și inventarieze foarte riguros toate obținurile de încercări deoarece dimensiunile, tipurile de racorduri gradele de oțel folosite în calculele de simulare produc diferențe importante asupra parametrilor modelați.

Așa după cum s-a precizat de la început, obiectivul principal al acestui exercițiu este de a calcula forțele normale care se dezvoltă în garnitura de foraj mai ales în intervalul de creștere a înclinării găurii de sondă de la 0° la 90° respectiv de la 2670 m MD/TVD la 3060 /2899 m MD/TVD, având ca efect major uzura prematură a coloanei intermediare de 177,8 mm (157,1mm ID) cu sabotul la aceasta cotă, și deci de a vedea exact cum va fi afectat programul ulterior de completare și testare a sondei, având diminuate presiunile de spargere și colaps pentru coloana intermediară. Pentru executarea exercițiului de proiectare asumat, este necesar ca traiectul găurii de sondă să se împartă în intervale de gaură dreaptă (respectiv verticală, tangentă, orizontală) și intervale curbe, deoarece aparatul matematic folosește formule distincte pentru fiecare interval.

4.2. Forțele de frecare și momentele pentru secțiuni de gaură dreaptă (verticală, orizontală, înclinată tangentă)

Se utilizează modelul de frecare al lui Coulomb [47] pentru un element de lungime ΔL al garniturii de material tubular. Forța necesară pentru mișcarea acestui element este dată de ecuația [47]:

$$\Delta F = \beta w \Delta L \cdot (\cos \alpha +/\mu \sin \alpha) \quad (4.1)$$

în care:

ΔF este forța necesară mișcării aferentă lungimii ΔL ;

β - coeficientul de flotabilitate al materialului;

α - unghiul de înclinare al găurii de sondă: 0° – sonda verticală ; 90° - sondă orizontală;

μ - coeficientul de frecare.

Observație. **Semnul +** reprezintă extragere (mișcare ascendentă și forțe de tracțiune), iar **semnul -** reprezintă introducere (mișcare descendentă și forțe de compresie)

Având tabelate elementele de mai sus și folosindu-se ecuația 4.1, se începe calculul de la sapă către suprafață pe intervale determinate de componența elementelor din BHA, apoi din 30 in 30 metri așa după cum au fost măsurate datele de deviație ale găurii de sondă pe intervalele drepte și/sau înclinate sau tangente conform cu datele din tabelul 4.3.

Dacă garnitura de foraj a fost divizată în n elemente, atunci:

F_{i+1} este forța la capătul inferior al fiecărui element;

F_1 - forța la capătul superior al fiecărui element care se adună până la lungimea totală a secțiunii de calcul.

Notă. Garnitura de foraj poate conține și/ sau poate fi imersată în fluid de foraj de densități, diferite β_i și fiecare element al garniturii de foraj poate avea greutatea liniară w_i diferite.

Ecuația 4.1 poate fi transcrisă în forma [47]:

$$\sum_{i=2}^n F_i = \sum_{i=2}^n F_{i-1} + \sum_{i=2}^n \{ \beta w \Delta L (\cos \alpha + (-) \mu \sin \alpha) \}_i \quad (4.2)$$

Când coeficientul de frecare μ este egal cu 0, ecuația arată greutatea statică a garniturii în secțiunea dreaptă în timpul forajului.

Momentul sau frecarea de rotație este definit ca produsul dintre coeficientul de frecare și valoarea normală a momentului de rotație [47]

$$T = \mu \cdot (\beta w \Delta L r \sin \alpha) \quad (4.3)$$

Pentru $\alpha = 0^\circ$, deci într-o secțiune verticală, nu se dezvoltă moment. Pentru $\alpha = 90^\circ$, deci într-o secțiune de gaură orizontală, momentul dezvoltat va avea valoare maximă. Ecuația momentului dezvoltat de-a lungul unei porțiuni de gaură dreaptă (verticală, orizontală sau înclinată la un unghi α), este dată de ecuația [47]:

$$\sum_{i=2}^n T_i = \sum_{i=2}^n T_i + \sum_{i=2}^n \{ \mu \times \beta w \Delta L r \sin \alpha \} \quad (4.4)$$

Notă. Este de menționat ca într-o garnitură de foraj, inclusiv BHA, pot exista mai multe raze pentru racorduri r_i . De asemenea, la forajul Rotary momentul la sapă este o valoare asumată prin experiență de șantier pe zona respectiva. În ecuația 4.4, pentru $i = 2$ T_1 = momentul la sapă.

4.3. Momentul și frecarea pentru secțiuni de gaură curbilinii (creștere/ scădere a înclinării și/ sau întoarcere la azimut)

Aadony et all, în 2009 [47] au dezvoltat o nouă serie de ecuații pentru moment si forțe de frecare care se dezvoltă în intervale de găuri curbe. S -a plecat de la intensitatea de deviere maxima (*Dog Leg Severity*) care se manifestă în găuri cu creștere de înclinare, scădere sau modificarea de azimut.

Astfel, un DLS Θ_i pentru o porțiune de gaură definită printr-o succesiune de înclinări α_i , azimutul φ_i se definește astfel [47]:

$$\cos \Theta_i = \sin \alpha_i \sin \alpha_{i-1} \cos (\varphi_i - \varphi_{i-1}) + \cos \alpha_i \cos \alpha_{i-1} \quad (4.5)$$

Subsecvent, pentru un tronson de gaură de sondă curbă în zona de creștere/ scădere a înclinării și/ sau a întoarcerii către azimut, forța axială pentru un element "i = 2" de garnitură, va fi dată de ecuația [47]:

$$F_2 = F_1 \times e^{(+/- \mu_2 \Theta_2)} + \beta_2 W_2 \Delta L_2 \times \left\{ \frac{\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right\} \quad (4.6)$$

în care semnul "+" definește extragerea elementului de garnitură – mișcare ascendentă. Iar semnul "-" definește introducerea elementului de garnitură – mișcare descendentă.

Pentru totalitatea elementelor secțiunii de gaură curbilinie, așa cum au fost descrise mai sus, ecuația (4.6) devine [47]:

$$\sum_{i=2}^n F_i = \sum_{i=2}^n [F_{i-1} \times e^{+/- \mu_i}] \times \sum_{i=2}^n \left\{ \beta_i W_i \Delta L_i \times \left\{ \frac{\sin \alpha_i - \sin \alpha_{i-1}}{\alpha_i - \alpha_{i-1}} \right\} \right\} \quad (4.7)$$

în care semnul + definește mișcarea în sens ascendant / extragere, iar semnul – definește mișcarea în sens descendent / introducere. Atunci când coeficientul de frecare $\mu = 0$, ecuația (4.6) definește greutatea statică a întregului tronson situat pe partea de traiectorie curbă.

Calculul momentului pentru elementul încovoiat "2" din garniture de foraj se calculează cu ajutorul relației [47]

$$T_2 = \mu_2 \cdot r_2 F_1 [\Theta_2 - \Theta_1] \quad (4.8)$$

(T_1 poate fi momentul la sapă sau momentul calculat deja la capătul inferior al segmentului de gaură curbiliniu).

Momentul total se calculează însumând momentele calculate de jos în sus pentru fiecare element de garnitură de foraj aflată în traiectul curbiliniu [47]:

$$\sum_{i=2}^n T_i = \sum_{i=2}^n \mu_i \cdot r_i F_{i-1} [\Theta_i - \Theta_{i-1}] \quad (4.9)$$

4.4. Efectul combinat al mișcării axiale și mișcării de rotație asupra forței de frecare și al momentului de torsiune

Conform studiilor efectuate de Aadony și Andersen 2001 [47], s-a observat că frecarea se subdivide în două direcții, respectiv o frecare axială și o frecare rotațională. Aadony și Andersen au dezvoltat un model simplu de combinare pentru mișcarea axială și cea rotațională care arată că mișcarea de rotație reduce frecările axiale în timpul reciprocării – manevrării garniturii de foraj în sens ascendent / descendent pe lungimea unei bucăți sau a unui pas de prăjini de foraj. În timpul mișcării combinate (axiale și de rotație), viteza axială V_h și viteza tangențială V_r se pot compune după o viteză rezultantă V , așa cum este arătat în figura 4.4.

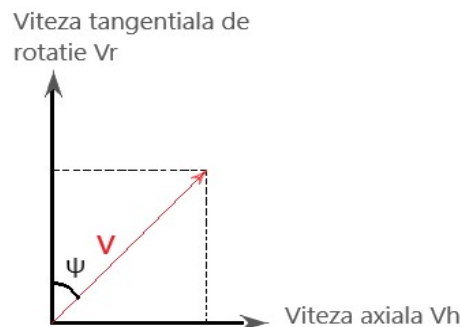


Fig. 4.4. Compunerea vitezei rotațională și a vitezei axiale

Unghiul ψ dintre cele două viteze este definit ca [47]

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{V_h}{V_r} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{60 V_h}{2 \pi R P M \cdot r} \right) \quad (4.10)$$

Dacă: $\Psi = 90^\circ \Rightarrow$ nu există mișcare de rotație în timpul mișcării axiale în sens ascendent / descendent a garniturii de material tubular; dacă $\Psi = 0^\circ \Rightarrow$ nu există mișcare axială ci doar mișcare de rotație.

Vitezele axiale și de rotație variază atât în timpul forajului, cât și în timpul corectării găurii în sens descendent sau ascendent (*backreaming*), ca atare unghiul Ψ poate avea valori diferite în fiecare moment de timp.

4.5. Ecuațiile pentru forțe de frecare și momente (ecuații *Torque & Drag*)

Aceste ecuații definesc scenariile de operațiuni cu garnitura de material tubular (prăjini de foraj; coloane de tubing sau burlane) care se execută în gaura de sondă, respectiv:

- introducere (cu rotație);
- introducere (fără rotație);
- extragere (cu rotație);
- extragere (fără rotație);
- circulație la talpă sau circulații intermediare cu rotație;
- corectare normală (mișcare axială descendentă cu rotație);
- corectare ascendentă (*backreaming* – mișcare ascendentă cu rotație);
- foraj Rotary (mișcare descendentă cu rotație);
- foraj *sliding* (direcțional) fără rotație.

Notă: Valorile unghiului Ψ precum și semnul “+” sau “-” pentru coeficientul de frecare μ , definesc, în fapt, scenariile de mai sus și care sunt rezumate în tabelul 4.4 [45].

Tabelul 4.4. Valorile unghiului Ψ pentru diferite scenarii de operațiuni

Nr.	Condiție	Viteză Rot.	Viteză Axială	Moment	Forța de tragere (frecarea)	Scenariul de operare
1	$\Psi = 0^\circ$	0 <	= 0	Maxim	$\mu = 0$	Foraj
2	$\Psi = 90^\circ$	= 0	0 <	= 0	$\mu > 0$	Foraj direcțional <i>Sliding</i> (DD)
3	$\Psi = (0^\circ, 90^\circ)$	0 <	0 <	0 <	+ μ - μ	Corectare desc. Corectare asc.
4	$\Psi = 90^\circ$	= 0	0 <	= 0	+ μ Max - μ Max	Extragere Introducere
5	$\Psi = 0^\circ$	0 <	= 0	> 0	0	Rotație la talpă

Ca atare, setul de ecuații *Torque and Drag* se vor exprima după cum urmează:

a) Pentru tronsoane de gaură dreaptă (verticale, orizontale, tangente sub un unghi de înclinare):
- pentru forțe axiale [47]

$$\sum_{i=2}^n F_i = \sum_{i=2}^n F_{i-1} + \sum_{i=2}^n \{ \beta w \Delta L \cos \alpha \}_i \pm \sum_{i=2}^n \beta w \Delta L \sin \alpha \mu \sin \Psi \}_i \quad (4.11)$$

- pentru momente [47]

$$\sum_{i=2}^n T_i = \sum_{i=2}^n \{ \beta w \Delta L r \sin \alpha \mu \sin \alpha \cos \Psi \}_i \quad (4.12)$$

b) Pentru tronsoane de gaură curbilinie creștere/scădere de înclinare și/sau întoarcere către azimut:
- pentru forțe axiale [47]

$$\sum_{i=2}^n F_i = \sum_{i=2}^n F_{i-1} + \sum_{i=2}^n \left[F_{i-1} \left(e^{+(-)\mu_i \theta_i} - 1 \right) \sin \Psi_i \right] + \sum_{i=2}^n \{ \beta_i w_i \Delta L_i \times \left[\frac{\sin \alpha_i - \sin \alpha_{i-1}}{\alpha_i - \alpha_{i-1}} \right] \} \quad (4.13)$$

- pentru momente [47]

$$\sum_{i=2}^n T_i = \sum_{i=2}^n \mu_i \times r_i F_{i-1} [\Theta_i - \Theta_{i-1}] \times \cos \Psi_i \quad (4.14)$$

Setul de ecuații 4.11 până la 4.14 definesc ecuațiile de momente și forțe (ecuațiile *Torque and Drag*) [47].

Semnificații:

F_N – forța normală	[daN]
i – partea superioară a unui element	
$i-1$ – partea inferioară a unui element	
D – diametrul găurii de sondă	[m]
D_i – diametrul interior al ultimei coloane tubate	[m]

DLS – intensitatea maximă de deviere	[°/30 m]
F ₁ – forța axială la baza primului element (sapă)	[daN]
F ₂ – forța axială la capul primului element	[daN]
L – lungimea materialului tubular	[m]
N _R sau RPM – rotații pe minut - garnitură	
ROP – rata de penetrare	[m/oră]
'r – raza materialului tubular sau a conexiunii	[m]
T – momentul în garnitura de foraj	[daN · m]
V – viteza rezultantă a garniturii de foraj	[m/min]
V _h - viteza axială a garniturii de foraj	[m/min]
V _r – viteza radială a garniturii de foraj	[m/sec]
V _p - viteza de manevră a garniturii de foraj	[m/sec]
'w – greutatea liniară a elementului de garniturii de foraj inclusive BHA	[daN/m]
W – greutatea totală a garniturii de foraj inclusive BHA	[daN]
'α - unghiul de înclinare al sondei într-un punct de măsură	[rad]
'β – coeficientul de flotabilitate al materialului tubular din sondă	
'θ- unghiul de variație absolut al azimutului sondei într-un punct de măsură	
'μ – coeficient de frecare	
'ρ – densitatea fluidelor din gaura de sondă și din interiorul materialului tubular	[kg/m ³]
Ψ – unghiul dintre viteza axială și viteza tangențială	[rad]
φ – unghiul de azimut într-un punct de măsură în gaura de sondă	[rad]

Există o multitudine de factori care afectează coeficienții de frecare. Este vorba, în principal, de: efectul combinat al mișcării axiale cu cea circulară; efectul hidrodinamic al forțelor vâscoase; efectul suprafețelor de contact; frecarea generată în scripetii sistemului de manevră; rigiditatea materialului tubular care se manevrează în sondă; existența găurilor de cheie; gradul de curățare al fluidului de foraj; existența în BHA a stabilizatorilor, lărgitorilor etc; racordurile materialului tubular; proprietățile formațiunilor geologice traversate; instabilitatea găurii de sondă; existența hidrocarburilor; natura suprafețelor de contact ș.a.

4.6. Analiza diagramelor de forțe axiale pentru diferite scenarii de operare – starea de fambaj

Pentru aplicarea, în practică, a setului de ecuații de forțe și momente se completează tabelul 4.5 conținând datele de proiectare ale sondei WP1A

Tabelul 4.5. Datele de proiectare ale sondei WP1A

Well WP1A				BHA de la sapa catre suprafata												
Parametri	INTRARE		INTRARE	Spec.		m		m		m	Mase lineare	kg/m	Lungimi tronsoane	m	Mase tronsoane	
WOB daN = Variabila	D sapa m =	0,155	PDM	OD 1	0,12	ODR1	0,12	ID 1	0,044	w 1	60		L 1	10	w1L1	
RPM = Variabila	Md finala m =	5460	NMDC	OD 2	0,12	ODR2	0,12	ID 2	0,038	w2	80,8		L 2	10	w2L2	
ROP m/ora = Variable	ID Coloana m	0,157	MWD	OD 3	0,12	ODR3	0,12	ID 3	0,057	w3	69,6		L 3	20	w3L3	
p fluid SG = 1,2	Sabot m MD	3060	NMDC	OD 4	0,12	ODR4	0,12	ID 4	0,038	w4	80,8		L 4	10	w4L4	
β flotabilitate = 0,848	L Gaura libera	2400														
Vmanevra m/min = Variabila	L gaura tubata	3060														
Moment la sapa Variabila																
													TOTAL	50	m	
	From	To	Meters	Garnitura de foraj de la capatul superior BHA catre suprafata												
Gaura dreapta	0	2640	2640	PF D1	OD1	0,101	ODR1	0,133	ID 1	0,0823	w 1	26,6		L 1	2620	w1L1
Gaura curba	2640	3090	450	HWDP	OD2	0,101	ODR2	0,133	ID 2	0,065	w2	61		L 2	300	w2L2
Gaura dreapta	3090	5460	2370	PF D2	OD3	0,101	ODR3	0,133	ID 3	0,0823	w3	26,6		L 3	2490	w3L3
μ Gaura libera	0,35	0,37			OD4		ODR4		ID 4		w4			L 4		w4L4
μ Gaura tubata	0,15	0,18														
													Total	5410	m	

Cu aceste date se efectuează calculele preliminare conform tabelului 4.6.

Tabelul 4.6. Calcule preliminare pentru sonda WP1A

PROIECTAT				(Date calculate)			Garnitura			Calculare preliminare						
#	MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	De la Sapa la zi									
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	a/30 m	Spec	Lm	Increment m	Sin α	Cos α	Cos α + μSin α	Cos α - μSin α	μ abs(02-01)	μ abs(02-01)	Sa2 - Sa1/(a2 - a1)
1	0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0,0	0,000	1,000	1	1,00	0,00	0,00	1,0000
2	2650	0,0	0	2650,0	0,0	0,0	DP2	2630,0	5460,0	0,000	1,000	1,00	1,00	0,00	0,00	1,0000
3	2670	3,25	67,9	2670,0	0,3	3,2	DP2	30,0	2830,0	0,057	0,998	1,0068956	0,99	0,01	-0,01	0,9995
4	2730	21,25	67,9	2728,4	5,3	9,0	DP2	60,0	2800,0	0,362	0,932	0,9863736	0,88	0,02	-0,02	0,9732
5	2760	30,25	67,9	2755,4	10,4	9,0	HWDP	30,0	2740,0	0,504	0,864	0,9394016	0,79	0,00	0,00	0,8998
6	2790	39,25	67,9	2780,0	17,1	9,0	HWDP	30,0	2710,0	0,633	0,774	0,8692984	0,68	0,00	0,00	0,8208
7	2820	48,25	67,9	2801,6	25,2	9,0	HWDP	30,0	2680,0	0,746	0,666	0,7777903	0,55	0,00	0,00	0,7216
8	2830	51,49	67,9	2808,1	28,2	9,7	HWDP	30,0	2650,0	0,782	0,623	0,7400261	0,51	0,00	0,00	0,6444
9	2850	53	67,9	2820,1	34,5	2,3	HWDP	30,0	2620,0	0,799	0,602	0,7216103	0,48	0,02	-0,02	0,6123
10	2880	55	67,9	2837,3	44,1	2,0	HWDP	30,0	2590,0	0,819	0,574	0,6964492	0,45	0,00	0,00	0,5878
11	2910	56,23	67,9	2854,2	53,8	1,2	HWDP	30,0	2560,0	0,831	0,556	0,6805518	0,43	0,00	0,00	0,5647
12	2940	68	67,9	2868,2	64,2	11,8	HWDP	30,0	2530,0	0,927	0,375	0,5136842	0,24	0,03	-0,03	0,4669
13	2970	68,23	67,9	2879,3	75,1	0,2	HWDP	30,0	2500,0	0,929	0,371	0,5101837	0,23	0,03	-0,03	0,3727
14	3000	74,23	67,9	2888,9	86,3	6,0	HWDP	30,0	2470,0	0,962	0,272	0,4161305	0,13	0,02	-0,02	0,3216
15	3030	80,23	67,9	2895,6	97,7	6,0	DP1	30,0	2440,0	0,985	0,170	0,3175181	0,02	0,00	0,00	0,2209
16	3060	86,23	67,9	2899,1	109,4	6,0	DP1	30,0	2410,0	0,998	0,066	0,4149941	-0,28	0,00	0,00	0,1178
17	3090	90	66,42	2900,1	121,5	6,0	DP1	30,0	2380,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	0,0329
18	3120	90	62,42	2900,1	134,9	4,0	DP1	30,0	2350,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,01	-0,01	-
19	3150	90	58,42	2900,1	150,1	4,0	DP1	30,0	2320,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
20	3180	90	54,42	2900,1	167,2	4,0	DP1	30,0	2290,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
21	3210	90	50,42	2900,1	185,9	4,0	DP1	30,0	2260,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
22	3240	90	46,42	2900,1	206,1	4,0	DP1	30,0	2230,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
23	3270	90	42,42	2900,1	227,9	3,8	DP1	30,0	2200,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
24	3300	90	38,42	2900,1	251,1	4,0	DP1	30,0	2170,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
25	3330	90	34,42	2900,1	275,5	4,0	DP1	30,0	2140,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
26	3360	90	30,42	2900,1	301,1	4,0	DP1	30,0	2110,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
27	3390	90	26,42	2900,1	327,7	4,0	DP1	30,0	2080,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
28	3420	90	22,42	2900,1	355,3	4,0	DP1	30,0	2050,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
29	3450	90	18,42	2900,0	383,6	4,0	DP1	30,0	2020,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
30	3480	90	14,42	2899,9	412,5	4,0	DP1	30,0	1990,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
31	3510	90	10,42	2899,7	441,9	4,0	DP1	30,0	1960,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
32	3540	90	6,43	2899,4	471,6	4,0	DP1	30,0	1930,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
33	3570	90	2,43	2899,1	501,6	4,0	DP1	30,0	1900,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
34	3600	90	0	2898,6	531,6	2,4	DP1	30,0	1870,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,01	-0,01	-
35	3630	90	0	2898,2	561,6	0,0	DP1	30,0	1840,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,01	-0,01	-
36	3660	90	0	2897,8	591,6	0,0	DP1	30,0	1810,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
37	3690	90	0	2897,3	621,6	0,0	DP1	30,0	1780,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
38	3720	90	0	2896,9	651,6	0,0	DP1	30,0	1750,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
39	3750	90	0	2896,5	681,6	0,0	DP1	30,0	1720,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
40	3780	90	0	2896,0	711,6	0,0	DP1	30,0	1690,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
41	3810	90	0	2895,6	741,5	0,0	DP1	30,0	1660,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
42	3840	90	0	2895,1	771,5	0,0	DP1	30,0	1630,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
43	3870	90	0	2894,7	801,5	0,0	DP1	30,0	1600,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
44	3900	90	0	2894,7	801,5	0,0	DP1	30,0	1570,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
45	3930	90	0	2894,3	831,5	0,0	DP1	30,0	1540,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
46	3960	90	0	2893,8	861,5	0,0	DP1	30,0	1510,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
47	3990	90	0	2893,4	891,5	0,0	DP1	30,0	1480,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
48	4020	90	0	2892,9	921,5	0,0	DP1	30,0	1450,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
49	4050	90	0	2892,5	951,5	0,0	DP1	30,0	1420,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
50	4080	90	0	2892,1	981,5	0,0	DP1	30,0	1390,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
51	4110	90	0	2891,6	1011,5	0,0	DP1	30,0	1360,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
52	4140	90	0	2891,2	1041,5	0,0	DP1	30,0	1330,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
53	4170	90	0	2890,7	1071,5	0,0	DP1	30,0	1300,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
54	4200	90	0	2890,3	1101,5	0,0	DP1	30,0	1270,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
55	4230	90	0	2889,9	1131,5	0,0	DP1	30,0	1240,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
56	4260	90	0	2889,4	1161,5	0,0	DP1	30,0	1210,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
57	4290	90	0	2889,0	1191,5	0,0	DP1	30,0	1180,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
58	4320	90	0	2888,5	1221,5	0,0	DP1	30,0	1150,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
59	4350	90	0	2888,1	1251,5	0,0	DP1	30,0	1120,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
60	4380	90	0	2887,7	1281,5	0,0	DP1	30,0	1090,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
61	4410	90	0	2887,2	1311,5	0,0	DP1	30,0	1060,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
62	4440	90	0	2886,8	1341,5	0,0	DP1	30,0	1030,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
63	4470	90	0	2886,3	1371,4	0,0	DP1	30,0	1000,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
64	4500	90	0	2885,9	1401,4	0,0	DP1	30,0	970,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
65	4530	90	0	2885,5	1431,4	0,0	DP1	30,0	940,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
66	4560	90	0	2885,0	1461,4	0,0	DP1	30,0	910,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
67	4590	90	0	2884,6	1491,4	0,0	DP1	30,0	880,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
68	4620	90	0	2884,1	1521,4	0,0	DP1	30,0	850,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
69	4650	90	0	2883,7	1551,4	0,0	DP1	30,0	820,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
70	4680	90	0	2883,3	1581,4	0,0	DP1	30,0	790,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
71	4710	90	0	2882,8	1611,4	0,0	DP1	30,0	760,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
72	4740	90	0	2882,4	1641,4	0,0	DP1	30,0	730,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
73	4770	90	0	2881,9	1671,4	0,0	DP1	30,0	700,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
74	4800	90	0	2881,5	1701,4	0,0	DP1	30,0	670,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
75	4830	90	0	2881,1	1731,4	0,0	DP1	30,0	640,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
76	4860	90	0	2880,6	1761,4	0,0	DP1	30,0	610,0	1,000	0,000	0,35	-0,35	0,00	0,00	-
77	4890	90	0	2880,2	1847,1	0,0	DP1	30,0</								

PROIECTAT				(Date calculate)			SCENERII DE OPERARE A					
#	MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	Extragere fara Rotire		Introducere fara rotire		Static la Talpa $\mu=0$	
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	$\alpha/30$ m	FN [N]	Forta Axiala [daN]	FN [N]	Forta Axiala [daN]	FN [N]	Forta Axiala [daN]
1	0	0	0	0,0	0	0	0	96762	0	44727,9	0	71572
2	2650	0,0	0	2650,0	0,0	0	0	37438	0	-14596,5	0	12248
3	2670	3,25	67,9	2670,0	0,3	3,2	668,0	36761	2470	-15273	668	11571
4	2730	21,25	67,9	2728,4	5,3	9,0	662,4	35109	662	-15412	662	10218
5	2760	30,25	67,9	2755,4	10,4	9,0	647,0	33651	647	-15789	647	9560
6	2790	39,25	67,9	2780,0	17,1	9,0	632,0	31506	632	-16195	632	8164
7	2820	48,25	67,9	2801,6	25,2	9,0	617,3	29530	617	-16612	617	6890
8	2830	51,49	67,9	2808,1	28,2	9,7	603,0	27751	603	-17037	603	5770
9	2850	53	67,9	2820,1	34,5	2,3	587,9	26080	588	-17502	588	4770
10	2880	55	67,9	2837,3	44,1	2,0	584,4	24982	584	-17632	584	3820
11	2910	56,23	67,9	2854,2	53,8	1,2	581,4	23944	581	-17749	581	2908
12	2940	68	67,9	2868,2	64,2	11,8	579,5	22994	580	-17834	580	2031
13	2970	68,23	67,9	2879,3	75,1	0,2	562,0	21596	562	-18400	562	1307
14	3000	74,23	67,9	2888,9	86,3	6,0	280,9	21005	281	-18430	281	728
15	3030	80,23	67,9	2895,6	97,7	6,0	139,4	20187	139	-18737	139	229
16	3060	86,23	67,9	2899,1	109,4	6,0	69,1	19726	69	-19038	69	80
17	3090	90	66,42	2900,1	121,5	6,0	34,3	19341	34	-19341,3	34	0
18	3120	90	62,42	2900,1	134,9	4,0	33,8	19104	34	-19104,4	34	0
19	3150	90	58,42	2900,1	150,1	4,0	32,9	18868	33	-18867,6	33	0
20	3180	90	54,42	2900,1	167,2	4,0	32,2	18631	32	-18630,7	32	0
21	3210	90	50,42	2900,1	185,9	4,0	31,4	18394	31	-18393,9	31	0
22	3240	90	46,42	2900,1	206,1	4,0	30,6	18157	31	-18157,0	31	0
23	3270	90	42,42	2900,1	227,9	3,8	29,9	17920	30	-17920,2	30	0
24	3300	90	38,42	2900,1	251,1	4,0	29,2	17683	29	-17683,3	29	0
25	3330	90	34,42	2900,1	275,5	4,0	28,5	17446	29	-17446,5	29	0
26	3360	90	30,42	2900,1	301,1	4,0	27,8	17210	28	-17209,7	28	0
27	3390	90	26,42	2900,1	327,7	4,0	27,2	16973	27	-16972,8	27	0
28	3420	90	22,42	2900,1	355,3	4,0	26,5	16736	26	-16736,0	26	0
29	3450	90	18,42	2900,0	383,6	4,0	25,9	16499	26	-16499,1	26	0
30	3480	90	14,42	2899,9	412,5	4,0	25,2	16262	25	-16262,3	25	0
31	3510	90	10,42	2899,7	441,9	4,0	24,6	16025	25	-16025,4	25	0
32	3540	90	6,43	2899,4	471,6	4,0	24,0	15789	24	-15788,6	24	0
33	3570	90	2,43	2899,1	501,6	4,0	23,5	15552	23	-15551,7	23	0
34	3600	90	0	2898,6	531,6	2,4	22,9	15315	23	-15314,9	23	0
35	3630	90	0	2898,2	561,6	0,0	22,6	15078	23	-15078,0	23	0
36	3660	90	0	2897,8	591,6	0,0	22,6	14841	22,6	-14841,2	23	0
37	3690	90	0	2897,3	621,6	0,0	22,6	14604	23	-14604,3	23	0
38	3720	90	0	2896,9	651,6	0,0	22,6	14367	23	-14367,5	23	0
39	3750	90	0	2896,5	681,6	0,0	22,6	14131	23	-14130,6	23	0
40	3780	90	0	2896,0	711,6	0,0	22,6	13894	23	-13893,8	23	0
41	3810	90	0	2895,6	741,5	0,0	22,6	13657	23	-13657,0	23	0
42	3840	90	0	2895,1	771,5	0,0	22,6	13420	23	-13420,1	23	0
43	3870	90	0	2894,7	801,5	0,0	22,6	13183	23	-13183,3	23	0
44	3900	90	0	2894,7	801,5	0,0	22,6	12946	23	-12946,4	23	0
45	3930	90	0	2894,3	831,5	0,0	22,6	12710	23	-12709,6	23	0
46	3960	90	0	2893,8	861,5	0,0	22,6	12473	23	-12472,7	23	0
47	3990	90	0	2893,4	891,5	0,0	22,6	12236	23	-12235,9	23	0
48	4020	90	0	2892,9	921,5	0,0	22,6	11999	23	-11999,0	23	0
49	4050	90	0	2892,5	951,5	0,0	22,6	11762	23	-11762,2	23	0
50	4080	90	0	2892,1	981,5	0,0	22,6	11525	23	-11525,3	23	0
51	4110	90	0	2891,6	1011,5	0,0	22,6	11288	23	-11288,5	23	0
52	4140	90	0	2891,2	1041,5	0,0	22,6	11052	23	-11051,6	23	0
53	4170	90	0	2890,7	1071,5	0,0	22,6	10815	23	-10814,8	23	0
54	4200	90	0	2890,3	1101,5	0,0	22,6	10578	23	-10578,0	23	0
55	4230	90	0	2889,9	1131,5	0,0	22,6	10341	23	-10341,1	23	0
56	4260	90	0	2889,4	1161,5	0,0	22,6	10104	23	-10104,3	23	0
57	4290	90	0	2889,0	1191,5	0,0	22,6	9867	23	-9867,4	23	0
58	4320	90	0	2888,5	1221,5	0,0	22,6	9631	23	-9630,6	23	0
59	4350	90	0	2888,1	1251,5	0,0	22,6	9394	23	-9393,7	23	0
60	4380	90	0	2887,7	1281,5	0,0	22,6	9157	23	-9156,9	23	0
61	4410	90	0	2887,2	1311,5	0,0	22,6	8920	23	-8920,0	23	0
62	4440	90	0	2886,8	1341,5	0,0	22,6	8683	23	-8683,2	23	0
63	4470	90	0	2886,3	1371,4	0,0	22,6	8446	23	-8446,3	23	0
64	4500	90	0	2885,9	1401,4	0,0	22,6	8209	23	-8209,5	23	0
65	4530	90	0	2885,5	1431,4	0,0	22,6	7973	23	-7972,6	23	0
66	4560	90	0	2885,0	1461,4	0,0	22,6	7736	23	-7735,8	23	0
67	4590	90	0	2884,6	1491,4	0,0	22,6	7499	23	-7498,9	23	0
68	4620	90	0	2884,1	1521,4	0,0	22,6	7262	23	-7262,1	23	0
69	4650	90	0	2883,7	1551,4	0,0	22,6	7025	23	-7025,3	23	0
70	4680	90	0	2883,3	1581,4	0,0	22,6	6788	23	-6788,4	23	0
71	4710	90	0	2882,8	1611,4	0,0	22,6	6552	23	-6551,6	23	0
72	4740	90	0	2882,4	1641,4	0,0	22,6	6315	23	-6314,7	23	0
73	4770	90	0	2881,9	1671,4	0,0	22,6	6078	23	-6077,9	23	0
74	4800	90	0	2881,5	1701,4	0,0	22,6	5841	23	-5841,0	23	0
75	4830	90	0	2881,1	1731,4	0,0	22,6	5604	23	-5604,2	23	0
76	4860	90	0	2880,6	1761,4	0,0	22,6	5367	23	-5367,3	23	0
77	4890	90	0	2880,2	1847,1	0,0	22,6	5130	23	-5130,5	23	0
78	4920	90	0	2879,7	1821,3	0,0	22,6	4894	23	-4893,6	23	0
79	4950	90	0	2879,3	1851,3	0,0	22,6	4657	23	-4656,8	23	0
80	4980	90	0	2878,9	1881,3	0,0	22,6	4420	23	-4419,9	23	0
81	5010	90	0	2878,4	1911,3	0,0	22,6	4183	23	-4183,1	23	0
82	5040	90	0	2878,0	1941,3	0,0	22,6	3946	23	-3946,3	23	0
83	5070	90	0	2877,5	1971,3	0,0	22,6	3709	23	-3709,4	23	0
84	5100	90	0	2877,1	2001,3	0,0	22,6	3473	23	-3472,6	23	0
85	5130	90	0	2876,7	2031,3	0,0	22,6	3236	23	-3235,7	23	0
86	5160	90	0	2876,2	2061,3	0,0	22,6	2999	23	-2998,9	23	0
87	5190	90	0	2875,8	2091,3	0,0	22,6	2762	23	-2762,0	23	0
88	5220	90	0	2875,4	2121,3	0,0	22,6	2525	23	-2525,2	23	0
89	5250	90	0	2874,9	2151,3	0,0	22,6	2288	23	-2288,3	23	0
90	5280	90	0	2874,5	2181,3	0,0	22,6	2051	23	-2051,5	23	0
91	5310	90	0	2874,0	2211,3	0,0	22,6	1815	23	-1814,6	23	0
92	5340	90	0	2873,6	2241,3	0,0	22,6	1578	23	-1577,8	23	0
93	5370	90	0	2873,2	2271,2	0,0	22,6	1341	23	-1340,9	23	0
94	5400	90	0	2873,6	2241,3	0,0	22,6	1104	23	-1104,1	23	0
95	5430	90	0	2873,2	2271,2	0,0	68,5	624	69	-624,5	69	0
96	5440	90	0	2872,7	2301,2	0,0	59,0	418	59	-417,9	59	0
97	5450	90	0	2872,3	2331,2	0,0	68,5	178	69	-178,1	69	0
98	5460	90	0	2872,3	2331,2	0,0	50,9	0	50,9	0	50,9	0

Se trasează curbele aferente operațiunilor din tabelul 4.7, așa după cum sunt redate în figura 4.5.

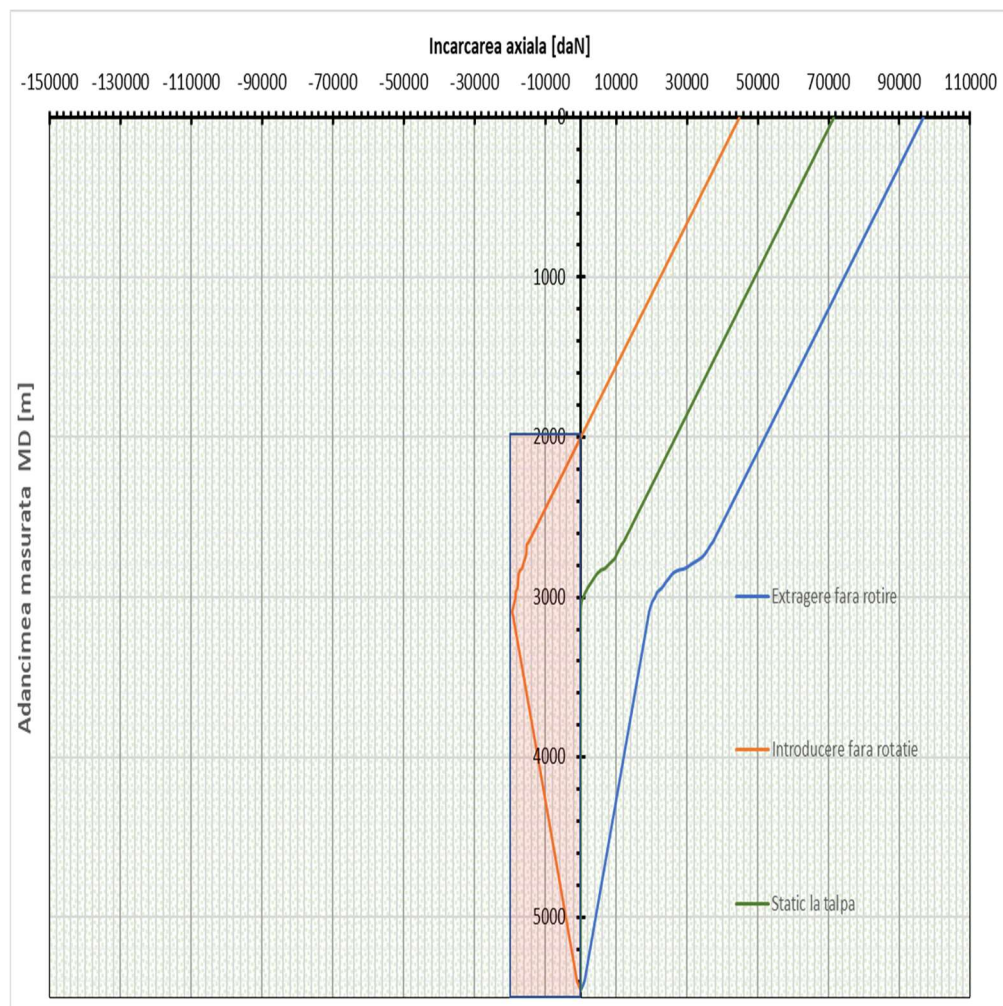


Fig. 4.5. Diagrama de încărcare a garniturii foraj la introducere/ extragere fără rotație și static la talpă

Se observă că de la 2000 m MD, la introducere fără rotație, garnitura de foraj intră în flambaj. Acest subiect va fi dezvoltat în cele ce urmează. Se trece apoi la aplicarea ecuațiilor de forțe și momente pentru varianta **introducere și extragere cu rotație**, așa după cum este arătat în tabelul 4.8.

Tabelul 4.8. Introducere și extragere cu rotire

PROIECTAT+A24:J42A24:JA24:J115				(Date calculate)			Garnitura			SCENARII DE OPERARE B			
#	MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	De la Sapa la zi			Extragere cu rotatie		Introducere cu rotatie	
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	α/30 m	Spec	Lm	Increment m	Parametri	Σ Fi	Parametri	Fi Σ Fi
1	0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0,0	RPM=	85530	RPM=	57629
2	2650	0,0	0	2650,0	0,0	0,0	DP2	2630,0	5460,0	80	26206	80	-1696
3	2670	3,25	67,9	2670,0	0,3	3,2	DP2	30,0	2830,0	VM [m/min] =	26202	VM [m/min] =	-1692
4	2730	21,25	67,9	2728,4	5,3	9,0	DP2	60,0	2800,0	27	24717	27	-3029
5	2760	30,25	67,9	2755,4	10,4	9,0	HWDP	30,0	2740,0	Va [m/s]=	23704	Va [m/s]=	-3633
6	2790	39,25	67,9	2780,0	17,1	9,0	HWDP	30,0	2710,0	0,45	21980	0,45	-4955
7	2820	48,25	67,9	2801,6	25,2	9,0	HWDP	30,0	2680,0	Vr [m/s]=	20401	Vr [m/s]=	-6137
8	2830	51,49	67,9	2808,1	28,2	9,7	HWDP	30,0	2650,0	0,557	18998	0,56	-7150
9	2850	53	67,9	2820,1	34,5	2,3	HWDP	30,0	2620,0	ψ=	17712	ψ=	-8057
10	2880	55	67,9	2837,3	44,1	2,0	HWDP	30,0	2590,0	0,6794434257	16699	0,68	-8974
11	2910	56,23	67,9	2854,2	53,8	1,2	HWDP	30,0	2560,0	SIN(ψ) =	15735	SIN(ψ) =	-9854
12	2940	68	67,9	2868,2	64,2	11,8	HWDP	30,0	2530,0	0,63	14829	0,63	-10708
13	2970	68,23	67,9	2879,3	75,1	0,2	HWDP	30,0	2500,0		13833	WOB [daN]	-11213
14	3000	74,23	67,9	2888,9	86,3	6,0	HWDP	30,0	2470,0		13250	0,00	-11787
15	3030	80,23	67,9	2895,6	97,7	6,0	DP1	30,0	2440,0		12626		-12166
16	3060	86,23	67,9	2899,1	109,4	6,0	DP1	30,0	2410,0		12354		-12194
17	3090	90	66,42	2900,1	121,5	6,0	DP1	30,0	2380,0		12153		-12153
18	3120	90	62,42	2900,1	134,9	4,0	DP1	30,0	2350,0		12004		-12004
19	3150	90	58,42	2900,1	150,1	4,0	DP1	30,0	2320,0		11856		-11856
20	3180	90	54,42	2900,1	167,2	4,0	DP1	30,0	2290,0		11707		-11707
21	3210	90	50,42	2900,1	185,9	4,0	DP1	30,0	2260,0		11558		-11558
22	3240	90	46,42	2900,1	206,1	4,0	DP1	30,0	2230,0		11409		-11409
23	3270	90	42,42	2900,1	227,9	3,8	DP1	30,0	2200,0		11260		-11260
24	3300	90	38,42	2900,1	251,1	4,0	DP1	30,0	2170,0		11112		-11112
25	3330	90	34,42	2900,1	275,5	4,0	DP1	30,0	2140,0		10963		-10963
26	3360	90	30,42	2900,1	301,1	4,0	DP1	30,0	2110,0		10814		-10814
27	3390	90	26,42	2900,1	327,7	4,0	DP1	30,0	2080,0		10665		-10665
28	3420	90	22,42	2900,1	355,3	4,0	DP1	30,0	2050,0		10516		-10516
29	3450	90	18,42	2900,0	383,6	4,0	DP1	30,0	2020,0		10367		-10367
30	3480	90	14,42	2899,9	412,5	4,0	DP1	30,0	1990,0		10219		-10219
31	3510	90	10,42	2899,7	441,9	4,0	DP1	30,0	1960,0		10070		-10070
32	3540	90	6,43	2899,4	471,6	4,0	DP1	30,0	1930,0		9921		-9921
33	3570	90	2,43	2899,1	501,6	4,0	DP1	30,0	1900,0		9772		-9772
34	3600	90	0	2898,6	531,6	2,4	DP1	30,0	1870,0		9623		-9623
35	3630	90	0	2898,2	561,6	0,0	DP1	30,0	1840,0		9474		-9474
36	3660	90	0	2897,8	591,6	0,0	DP1	30,0	1810,0		9326		-9326
37	3690	90	0	2897,3	621,6	0,0	DP1	30,0	1780,0		9177		-9177
38	3720	90	0	2896,9	651,6	0,0	DP1	30,0	1750,0		9028		-9028
39	3750	90	0	2896,5	681,6	0,0	DP1	30,0	1720,0		8879		-8879
40	3780	90	0	2896,0	711,6	0,0	DP1	30,0	1690,0		8730		-8730
41	3810	90	0	2895,6	741,5	0,0	DP1	30,0	1660,0		8581		-8581
42	3840	90	0	2895,1	771,5	0,0	DP1	30,0	1630,0		8433		-8433
43	3870	90	0	2894,7	801,5	0,0	DP1	30,0	1600,0		8284		-8284
44	3900	90	0	2894,7	801,5	0,0	DP1	30,0	1570,0		8135		-8135
45	3930	90	0	2894,3	831,5	0,0	DP1	30,0	1540,0		7986		-7986
46	3960	90	0	2893,8	861,5	0,0	DP1	30,0	1510,0		7837		-7837
47	3990	90	0	2893,4	891,5	0,0	DP1	30,0	1480,0		7689		-7689
48	4020	90	0	2892,9	921,5	0,0	DP1	30,0	1450,0		7540		-7540
49	4050	90	0	2892,5	951,5	0,0	DP1	30,0	1420,0		7391		-7391
50	4080	90	0	2892,1	981,5	0,0	DP1	30,0	1390,0		7242		-7242
51	4110	90	0	2891,6	1011,5	0,0	DP1	30,0	1360,0		7093		-7093
52	4140	90	0	2891,2	1041,5	0,0	DP1	30,0	1330,0		6944		-6944
53	4170	90	0	2890,7	1071,5	0,0	DP1	30,0	1300,0		6796		-6796
54	4200	90	0	2890,3	1101,5	0,0	DP1	30,0	1270,0		6647		-6647
55	4230	90	0	2889,9	1131,5	0,0	DP1	30,0	1240,0		6498		-6498
56	4260	90	0	2889,4	1161,5	0,0	DP1	30,0	1210,0		6349		-6349
57	4290	90	0	2889,0	1191,5	0,0	DP1	30,0	1180,0		6200		-6200
58	4320	90	0	2888,5	1221,5	0,0	DP1	30,0	1150,0		6051		-6051
59	4350	90	0	2888,1	1251,5	0,0	DP1	30,0	1120,0		5903		-5903
60	4380	90	0	2887,7	1281,5	0,0	DP1	30,0	1090,0		5754		-5754
61	4410	90	0	2887,2	1311,5	0,0	DP1	30,0	1060,0		5605		-5605
62	4440	90	0	2886,8	1341,5	0,0	DP1	30,0	1030,0		5456		-5456
63	4470	90	0	2886,3	1371,4	0,0	DP1	30,0	1000,0		5307		-5307
64	4500	90	0	2885,9	1401,4	0,0	DP1	30,0	970,0		5159		-5159
65	4530	90	0	2885,5	1431,4	0,0	DP1	30,0	940,0		5010		-5010
66	4560	90	0	2885,0	1461,4	0,0	DP1	30,0	910,0		4861		-4861
67	4590	90	0	2884,6	1491,4	0,0	DP1	30,0	880,0		4712		-4712
68	4620	90	0	2884,1	1521,4	0,0	DP1	30,0	850,0		4563		-4563
69	4650	90	0	2883,7	1551,4	0,0	DP1	30,0	820,0		4414		-4414
70	4680	90	0	2883,3	1581,4	0,0	DP1	30,0	790,0		4266		-4266
71	4710	90	0	2882,8	1611,4	0,0	DP1	30,0	760,0		4117		-4117
72	4740	90	0	2882,4	1641,4	0,0	DP1	30,0	730,0		3968		-3968
73	4770	90	0	2881,9	1671,4	0,0	DP1	30,0	700,0		3819		-3819
74	4800	90	0	2881,5	1701,4	0,0	DP1	30,0	670,0		3670		-3670
75	4830	90	0	2881,1	1731,4	0,0	DP1	30,0	640,0		3521		-3521
76	4860	90	0	2880,6	1761,4	0,0	DP1	30,0	610,0		3373		-3373
77	4890	90	0	2880,2	1847,1	0,0	DP1	30,0	580,0		3224		-3224
78	4920	90	0	2879,7	1821,3	0,0	DP1	30,0	550,0		3075		-3075
79	4950	90	0	2879,3	1851,3	0,0	DP1	30,0	520,0		2926		-2926
80	4980	90	0	2878,9	1881,3	0,0	DP1	30,0	490,0		2777		-2777
81	5010	90	0	2878,4	1911,3	0,0	DP1	30,0	460,0		2628		-2628
82	5040	90	0	2878,0	1941,3	0,0	DP1	30,0	430,0		2480		-2480
83	5070	90	0	2877,5	1971,3	0,0	DP1	30,0	400,0		2331		-2331
84	5100	90	0	2877,1	2001,3	0,0	DP1	30,0	370,0		2182		-2182
85	5130	90	0	2876,7	2031,3	0,0	DP1	30,0	340,0		2033		-2033
86	5160	90	0	2876,2	2061,3	0,0	DP1	30,0	310,0		1884		-1884
87	5190	90	0	2875,8	2091,3	0,0	DP1	30,0	280,0		1736		-1736
88	5220	90	0	2875,4	2121,3	0,0	DP1	30,0	250,0		1587		-1587
89	5250	90	0	2874,9	2151,3	0,0	DP1	30,0	220,0		1438		-1438
90	5280	90	0	2874,5	2181,3	0,0	DP1	30,0	190,0		1289		-1289
91	5310	90	0	2874,0	2211,3	0,0	DP1	30,0	160,0		1140		-1140
92	5340	90	0	2873,6	2241,3	0,0	DP1	30,0	130,0		991		-991
93	5370	90	0	2873,2	2271,2	0,0	DP1	30,0	100,0		843		-843
94	5400	90	0	2873,6	2241,3	0,0	DP1	30,0	70,0		694		-694
95	5430	90	0	2873,2	2271,2	0,0	BHA OD4	20,0	40,0		392		-392
96	5440	90	0	2872,7	2301,2	0,0	BHA OD 3	10,0	20,0		263		-263
97	5450	90	0	2872,3	2331,2	0,0	BHA OD 2	10,0	10,0		112		-112
98	5460	90	0	2872,3	2331,2	0,0	BHA OD 1	10,0	0,0		0		0

În continuare se trasează curbele aferente tabelului 4.8, după cum sunt redată în figura 4.6.

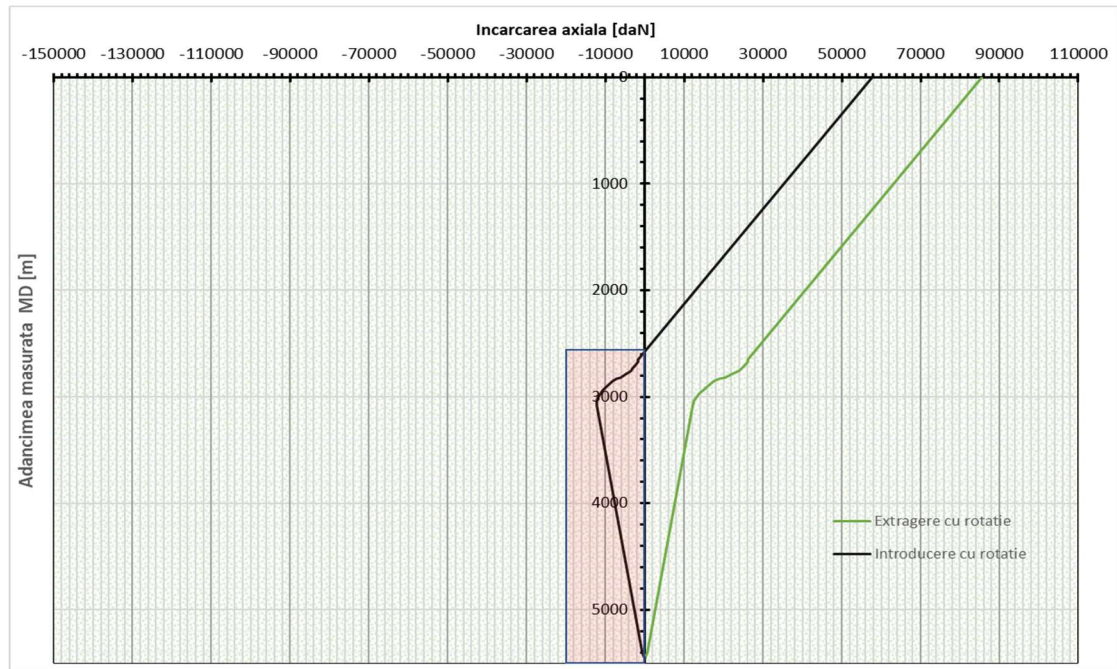


Fig. 4.6. Diagrama de încărcare a garniturii foraj la introducere/ extragere cu rotire

Se observă că la introducerea garniturii cu rotire, aceasta intră în flambaj de la 2500 m. Cumulativ, cele cinci scenarii de încărcare ale garniturii de foraj se prezintă ca în figura 4.7.

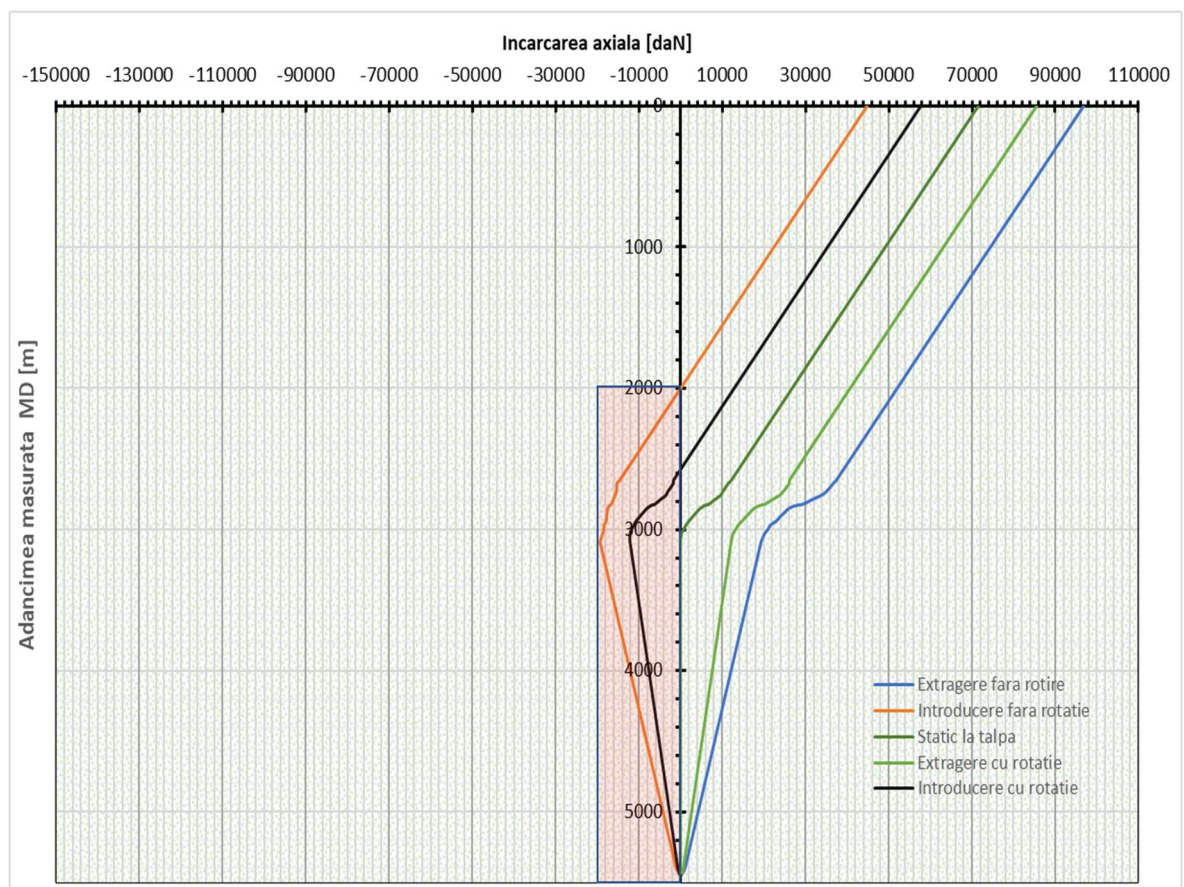


Fig. 4.7. Diagrama de încărcare a garniturii de foraj pentru 5 scenarii de operare în sonda WP1A

Ecuatiile de moment și sarcină, puse în practică, prezintă și avantajul că se pot realiza rapid calcule de sensibilitate, menținându-se constanți anumiți parametri și observându-se efectele la variația altor parametri. Ca

exemplu, este interesant de urmărit efectul vitezei de rotație a garniturii de foraj asupra sarcinii axiale în timpul extragerii, menținându-se constanți viteza de manevră și coeficienții de frecare din gaura liberă și din coloană. Datele sunt prezentate în tabelul 4.9, iar diagramele în figura 4.8.

Tabelul 4.9. Sarcini axiale în funcție de RPM

MD [m]	RPM				
	0	40	60	80	100
Valori Sarcini axiale [daN]					
0	96091	91652	88345	85530	83308
2650	36767	32327	29021	26206	23984
2670	36761	32322	29016	26202	23981
2730	35109	30747	27492	24717	22524
2760	33651	29492	26374	23704	21587
2790	31506	27540	24550	21980	19933
2820	29530	25746	22878	20401	18422
2830	27751	24138	21386	18998	17082
2850	26080	22643	20009	17712	15860
2880	24982	21584	18976	16699	14862
2910	23944	20580	17995	15735	13911
2940	22994	19650	17078	14829	13012
2970	21596	18437	15988	13833	12083
3000	21005	17849	15403	13250	11500
3030	20187	17120	14733	12626	10908
3060	19726	16746	14417	12354	10667
3090	19341	16445	14174	12153	10497
3120	19104	16244	14000	12004	10369
3150	18868	16043	13826	11856	10240
3180	18631	15841	13653	11707	10112
3210	18394	15640	13479	11558	9983
3240	18157	15439	13306	11409	9855
3270	17920	15237	13132	11260	9726
3300	17683	15036	12959	11112	9597
3330	17446	14834	12785	10963	9469
3360	17210	14633	12611	10814	9340
3390	16973	14432	12438	10665	9212
3420	16736	14230	12264	10516	9083
3450	16499	14029	12091	10367	8955
3480	16262	13827	11917	10219	8826
3510	16025	13626	11744	10070	8698
3540	15789	13425	11570	9921	8569
3570	15552	13223	11397	9772	8441
3600	15315	13022	11223	9623	8312
3630	15078	12821	11049	9474	8183
3660	14841	12619	10876	9326	8055
3690	14604	12418	10702	9177	7926
3720	14367	12216	10529	9028	7798
3750	14131	12015	10355	8879	7669
3780	13894	11814	10182	8730	7541
3810	13657	11612	10008	8581	7412
3840	13420	11411	9834	8433	7284
3870	13183	11209	9661	8284	7155
3900	12946	11008	9487	8135	7027
3930	12710	10807	9314	7986	6898
3960	12473	10605	9140	7837	6769
3990	12236	10404	8967	7688	6641
4020	11999	10203	8793	7540	6512
4050	11762	10001	8619	7391	6384
4080	11525	9800	8446	7242	6255
4110	11288	9598	8272	7093	6127
4140	11052	9397	8099	6944	5998
4170	10815	9196	7925	6796	5870
4200	10578	8994	7752	6647	5741
4230	10341	8793	7578	6498	5613
4260	10104	8591	7405	6349	5484
4290	9867	8390	7231	6200	5355
4320	9631	8189	7057	6051	5227
4350	9394	7987	6884	5903	5098
4380	9157	7786	6710	5754	4970
4410	8920	7585	6537	5605	4841
4440	8683	7383	6363	5456	4713
4470	8446	7182	6190	5307	4584
4500	8209	6980	6016	5159	4456
4530	7973	6779	5842	5010	4327
4560	7736	6578	5668	4861	4199
4590	7499	6376	5495	4712	4070
4620	7262	6175	5322	4563	3941
4650	7025	5973	5148	4414	3813
4680	6788	5772	4975	4266	3684
4710	6552	5571	4801	4117	3556
4740	6315	5369	4628	3968	3427
4770	6078	5168	4454	3819	3299
4800	5841	4967	4280	3670	3170
4830	5604	4765	4107	3521	3042
4860	5367	4564	3933	3373	2913
4890	5130	4362	3760	3224	2785
4920	4894	4161	3586	3075	2656
4950	4657	3960	3413	2926	2527
4980	4420	3758	3239	2777	2399
5010	4183	3557	3065	2628	2270
5040	3946	3355	2892	2480	2142
5070	3709	3154	2718	2331	2013
5100	3473	2953	2545	2182	1885
5130	3236	2751	2371	2033	1756
5160	2999	2550	2198	1884	1628
5190	2762	2348	2024	1736	1499
5220	2525	2147	1850	1587	1371
5250	2288	1946	1677	1438	1242
5280	2051	1744	1503	1289	1113
5310	1815	1543	1330	1140	985
5340	1578	1342	1156	991	856
5370	1341	1140	983	843	728
5400	1104	939	809	694	599
5430	624	531	458	392	339
5440	418	355	306	263	227
5450	178	151	130	112	97
5460	0	0	0	0	0

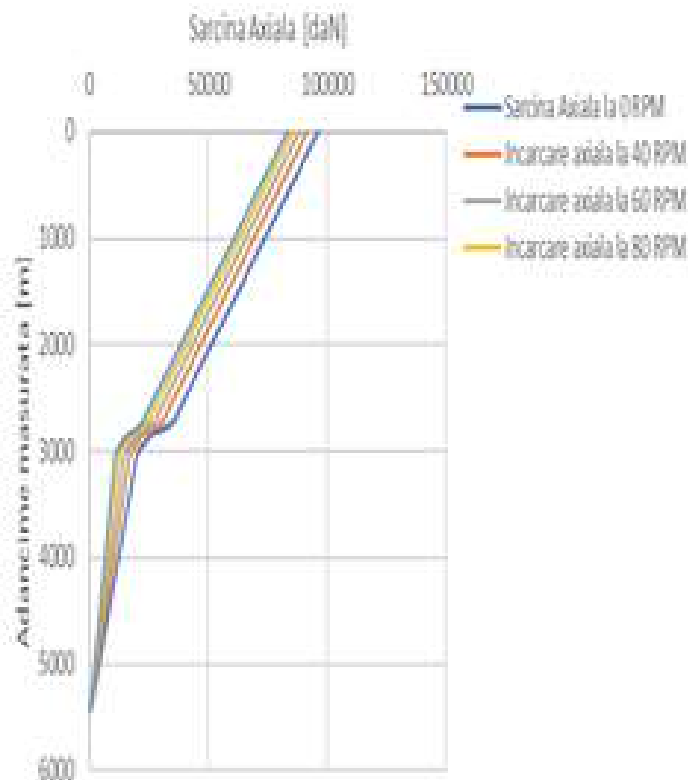


Fig. 4.8. Variația sarcinii axiale în garnitura de foraj, la extragere, în funcție de RPM, pentru factori de frecare constanți

Din figura 4.8 se poate remarca faptul că viteza de rotație are un efect echivalent ca și cel al reducerii factorilor de frecare. Pe de altă parte, este de menționat că vitezele de rotație ale garniturii în timpul extragerii sau corectare ascendentă, când instalația este dotată cu TDS, măresc sarcina axială, deci au un efect echivalent ca și creșterea factorilor de frecare în coloană și gaură liberă iar, pe de altă parte, generează fenomenul de „pistonaj”, cu efecte majore negative și nedorite din punct de vedere al stabilității găurii de sondă și al afluxului de fluide din strat. Datele din calculele de sensibilitate sunt prezentate în tabelul 4.10, iar diagramele în figura 4.9.

Tabelul 4.10. Sarcini axiale la extragere în funcție de viteza de manevră

MD	Viteza ascensionala la manevra de extragere m /min				
[m]	0	18	27	54	70
	Valori Sarcini axiale la Extragere [daN]				FF=ct RPM=ct
0	70896	81582	85530	91652	93168
2650	11571	22257	26206	32327	33844
2670	11571	22255	26202	32322	33838
2730	10218	20818	24717	30747	32238
2760	9560	19935	23704	29492	30916
2790	8164	18332	21980	27540	28900
2820	6890	16868	20401	25746	27046
2830	5770	15573	18998	24138	25382
2850	4770	14397	17712	22643	23829
2880	3820	13409	16699	21584	22757
2910	2908	12466	15735	20580	21742
2940	2031	11572	14829	19650	20806
2970	1307	10690	13833	18437	19531
3000	728	10108	13250	17849	18943
3030	229	9538	12626	17120	18185
3060	80	9318	12354	16746	17782
3090	0	9170	12153	16445	17453
3120	0	9058	12004	16244	17240
3150	0	8946	11856	16043	17026
3180	0	8833	11707	15841	16812
3210	0	8721	11558	15640	16599
3240	0	8609	11409	15439	16385
3270	0	8496	11260	15237	16171
3300	0	8384	11112	15036	15957
3330	0	8272	10963	14834	15744
3360	0	8159	10814	14633	15530
3390	0	8047	10665	14432	15316
3420	0	7935	10516	14230	15102
3450	0	7823	10367	14029	14889
3480	0	7710	10219	13827	14675
3510	0	7598	10070	13626	14461
3540	0	7486	9921	13425	14248
3570	0	7373	9772	13223	14034
3600	0	7261	9623	13022	13820
3630	0	7149	9474	12821	13606
3660	0	7037	9326	12619	13393
3690	0	6924	9177	12418	13179
3720	0	6812	9028	12216	12965
3750	0	6700	8879	12015	12751
3780	0	6587	8730	11814	12538
3810	0	6475	8581	11612	12324
3840	0	6363	8433	11411	12110
3870	0	6250	8284	11209	11896
3900	0	6138	8135	11008	11683
3930	0	6026	7986	10807	11469
3960	0	5914	7837	10605	11255
3990	0	5801	7689	10404	11042
4020	0	5689	7540	10203	10828
4050	0	5577	7391	10001	10614
4080	0	5464	7242	9800	10400
4110	0	5352	7093	9598	10187
4140	0	5240	6944	9397	9973
4170	0	5128	6796	9196	9759
4200	0	5015	6647	8994	9545
4230	0	4903	6498	8793	9332
4260	0	4791	6349	8591	9118
4290	0	4678	6200	8390	8904
4320	0	4566	6051	8189	8691
4350	0	4454	5903	7987	8477
4380	0	4341	5754	7786	8263
4410	0	4229	5605	7585	8049
4440	0	4117	5456	7383	7836
4470	0	4005	5307	7182	7622
4500	0	3892	5159	6980	7408
4530	0	3780	5010	6779	7194
4560	0	3668	4861	6578	6981
4590	0	3555	4712	6376	6767
4620	0	3443	4563	6175	6553
4650	0	3331	4414	5973	6340
4680	0	3219	4266	5772	6126
4710	0	3106	4117	5571	5912
4740	0	2994	3968	5369	5698
4770	0	2882	3819	5168	5485
4800	0	2769	3670	4967	5271
4830	0	2657	3521	4765	5057
4860	0	2545	3373	4564	4843
4890	0	2432	3224	4362	4630
4920	0	2320	3075	4161	4416
4950	0	2208	2926	3960	4202
4980	0	2096	2777	3758	3989
5010	0	1983	2628	3557	3775
5040	0	1871	2480	3355	3561
5070	0	1759	2331	3154	3347
5100	0	1646	2182	2953	3134
5130	0	1534	2033	2751	2920
5160	0	1422	1884	2550	2706
5190	0	1310	1736	2348	2492
5220	0	1197	1587	2147	2279
5250	0	1085	1438	1946	2065
5280	0	973	1289	1744	1851
5310	0	860	1140	1543	1638
5340	0	748	991	1342	1424
5370	0	636	843	1140	1210
5400	0	523	694	939	996
5430	0	296	392	531	564
5440	0	198	263	355	377
5450	0	84	112	151	161
5460	0	0	0	0	0

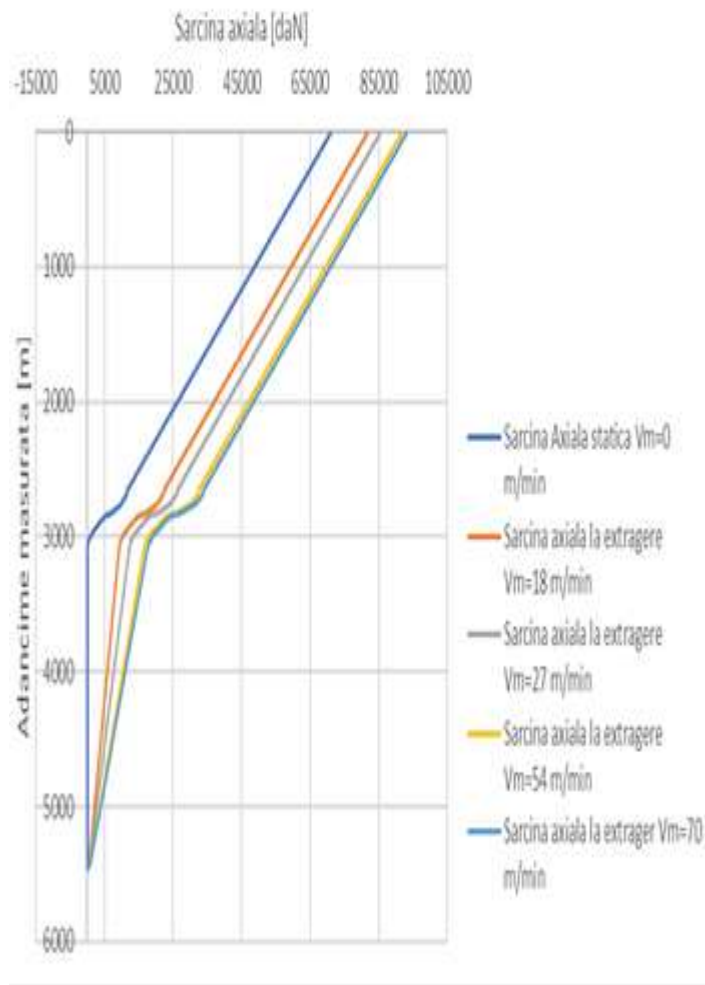


Fig.4.9. Sarcina axială în funcție de viteza de manevră

În mod similar se pot efectua analize de senzitivitate la introducerea garniturii de foraj la talpă cu diferite RPM și păstrând constantă viteza de manevră și coeficienții (factorii) de frecare în gaură liberă și gaură tubată, așa după cum se poate vedea din tabelul 4.11 și figura 4.10.

Tabelul 4.11. Sarcini axiale la introducere cu diferite RPM

MD [m]	RPM				
	0	40	60	80	100
Valori Sarcini axiale la introducere [daN]					
0	48112	53105	55085	57829	59641
2550	-11215	-7221	-4240	-1896	319
2570	-11207	-7216	-4236	-1892	319
2730	-12455	-8507	-5554	-3029	-1029
2760	-12506	-8564	-5606	-3055	-1056
2790	-13574	-10175	-7374	-4955	-3025
2820	-14796	-11222	-8499	-6157	-4242
2830	-15547	-12097	-9455	-7150	-5294
2850	-16557	-12945	-10355	-8057	-6222
2880	-17206	-13525	-11236	-8974	-7149
2910	-18025	-14575	-12102	-9854	-8055
2940	-18859	-15509	-12945	-10706	-8999
2970	-18972	-15514	-12967	-11215	-9455
3000	-19556	-16564	-13959	-11767	-10055
3030	-19726	-16660	-14275	-12166	-10445
3060	-19567	-16566	-14256	-12194	-10507
3090	-19541	-16445	-14174	-12155	-10497
3120	-19104	-16244	-14000	-12004	-10389
3150	-18868	-16045	-13826	-11856	-10240
3180	-18651	-15841	-13655	-11707	-10112
3210	-18394	-15640	-13479	-11556	-9985
3240	-18157	-15439	-13306	-11409	-9855
3270	-17920	-15237	-13132	-11260	-9726
3300	-17685	-15036	-12959	-11112	-9597
3330	-17448	-14834	-12785	-10965	-9469
3360	-17210	-14633	-12611	-10814	-9340
3390	-16975	-14432	-12435	-10665	-9212
3420	-16756	-14230	-12264	-10516	-9085
3450	-16499	-14029	-12091	-10367	-8955
3480	-16262	-13827	-11917	-10219	-8826
3510	-16025	-13626	-11744	-10070	-8696
3540	-15789	-13425	-11570	-9921	-8569
3570	-15552	-13223	-11397	-9772	-8441
3600	-15315	-13022	-11223	-9623	-8312
3630	-15078	-12821	-11049	-9474	-8185
3660	-14841	-12619	-10875	-9325	-8056
3690	-14604	-12418	-10702	-9177	-7928
3720	-14367	-12216	-10529	-9028	-7799
3750	-14131	-12015	-10355	-8879	-7669
3780	-13894	-11814	-10182	-8730	-7541
3810	-13657	-11612	-10008	-8581	-7412
3840	-13420	-11411	-9834	-8433	-7284
3870	-13183	-11209	-9661	-8284	-7155
3900	-12946	-11008	-9487	-8135	-7027
3930	-12710	-10807	-9314	-7986	-6898
3960	-12473	-10606	-9140	-7837	-6769
3990	-12236	-10404	-8967	-7688	-6641
4020	-11999	-10203	-8793	-7540	-6512
4050	-11762	-10001	-8619	-7391	-6384
4080	-11525	-9800	-8446	-7242	-6255
4110	-11288	-9598	-8272	-7093	-6127
4140	-11052	-9397	-8099	-6944	-5998
4170	-10815	-9196	-7925	-6795	-5870
4200	-10578	-8994	-7752	-6647	-5741
4230	-10341	-8793	-7578	-6498	-5612
4260	-10104	-8591	-7405	-6349	-5484
4290	-9867	-8390	-7231	-6200	-5355
4320	-9631	-8189	-7057	-6051	-5227
4350	-9394	-7987	-6884	-5903	-5098
4380	-9157	-7786	-6710	-5754	-4970
4410	-8920	-7585	-6537	-5605	-4841
4440	-8683	-7383	-6363	-5456	-4712
4470	-8446	-7182	-6190	-5307	-4584
4500	-8209	-6980	-6016	-5158	-4455
4530	-7973	-6779	-5842	-5010	-4327
4560	-7736	-6578	-5669	-4861	-4198
4590	-7499	-6376	-5495	-4712	-4070
4620	-7262	-6175	-5322	-4563	-3941
4650	-7025	-5973	-5148	-4414	-3812
4680	-6788	-5772	-4975	-4265	-3684
4710	-6552	-5571	-4801	-4117	-3555
4740	-6315	-5369	-4628	-3968	-3427
4770	-6078	-5167	-4454	-3819	-3299
4800	-5841	-4967	-4280	-3670	-3170
4830	-5604	-4765	-4107	-3521	-3042
4860	-5367	-4564	-3933	-3373	-2913
4890	-5130	-4362	-3760	-3224	-2785
4920	-4894	-4161	-3586	-3075	-2656
4950	-4657	-3960	-3413	-2926	-2527
4980	-4420	-3758	-3239	-2777	-2399
5010	-4183	-3557	-3065	-2628	-2270
5040	-3946	-3355	-2892	-2480	-2142
5070	-3709	-3154	-2718	-2331	-2013
5100	-3473	-2953	-2545	-2182	-1885
5130	-3236	-2751	-2371	-2033	-1756
5160	-2999	-2550	-2198	-1884	-1628
5190	-2762	-2348	-2024	-1735	-1499
5220	-2525	-2147	-1850	-1587	-1371
5250	-2288	-1946	-1677	-1438	-1242
5280	-2051	-1744	-1503	-1289	-1113
5310	-1815	-1543	-1330	-1140	-985

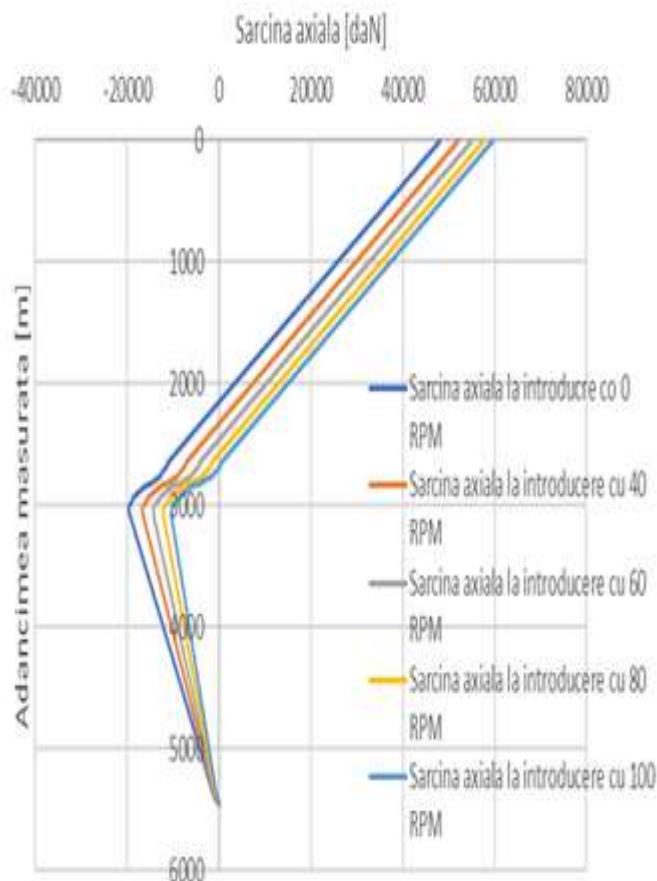


Fig. 4.10. Variația sarcinii axiale la introducere cu diferite RPM

Din diagramele figurii 4.10 se desprinde o concluzie deosebit de importantă: la introducere, o dată cu creșterea vitezei de rotație a garniturii de foraj (RPM), starea de flambaj este indusă la adâncimi mai mari, deci, cu cât viteza de rotație crește la introducere, punctul neutru superior se deplasează mai jos. Această caracteristică este extrem de importantă pentru forajul direcțional / sliding, la plasarea dispozitivelor de impact care funcționează în tracțiune, la plasarea altor dispozitive pentru care nu este indicat să funcționeze în compresiune.

În mod asemănător, în tabelul 4.12 și figura 4.11 este tratată variația forței axiale la introducere cu diferite viteze de manevră, menținându-se constantă viteza de rotație și factorii de frecare.

Tabelul 4.12. Forța axială la introducere cu diferite viteze

MD [m]	RPM=60				
	0 m/min	18 m/min	27 m/min	54 m/min	70 m/min
Valori Sarcini axiale la Introducere cu diferite Vm [daN]					
0	70896	58726	55085	50436	49394
2650	11571	-598	-4240	-8889	-9930
2670	11571	-595	-4236	-8884	-9925
2730	10218	-1938	-5554	-10158	-11188
2760	9560	-2561	-6106	-10588	-11587
2790	8164	-3903	-7374	-11732	-12699
2820	6890	-5106	-8499	-12731	-13667
2830	5770	-6141	-9455	-13558	-14463
2850	4770	-7086	-10335	-14229	-15013
2880	3820	-8009	-11236	-15098	-15875
2910	2908	-8894	-12102	-15935	-16704
2940	2031	-9752	-12948	-16762	-17528
2970	1307	-10289	-13367	-17005	-17731
3000	728	-10864	-13939	-17574	-18300
3030	229	-11259	-14273	-17818	-18523
3060	80	-11305	-14258	-17714	-18400
3090	0	-11280	-14174	-17543	-18209
3120	0	-11142	-14000	-17328	-17986
3150	0	-11004	-13826	-17113	-17763
3180	0	-10866	-13653	-16898	-17540
3210	0	-10728	-13479	-16684	-17317
3240	0	-10590	-13306	-16469	-17094
3270	0	-10452	-13132	-16254	-16871
3300	0	-10313	-12959	-16039	-16648
3330	0	-10175	-12785	-15824	-16425
3360	0	-10037	-12611	-15609	-16202
3390	0	-9899	-12438	-15395	-15979
3420	0	-9761	-12264	-15180	-15756
3450	0	-9623	-12091	-14965	-15533
3480	0	-9485	-11917	-14750	-15310
3510	0	-9347	-11744	-14535	-15087
3540	0	-9208	-11570	-14321	-14864
3570	0	-9070	-11397	-14106	-14641
3600	0	-8932	-11223	-13891	-14418
3630	0	-8794	-11049	-13676	-14195
3660	0	-8656	-10876	-13461	-13972
3690	0	-8518	-10702	-13246	-13749
3720	0	-8380	-10529	-13032	-13526
3750	0	-8241	-10355	-12817	-13303
3780	0	-8103	-10182	-12602	-13080
3810	0	-7965	-10008	-12387	-12857
3840	0	-7827	-9834	-12172	-12634
3870	0	-7689	-9661	-11957	-12411
3900	0	-7551	-9487	-11743	-12188
3930	0	-7413	-9314	-11528	-11965
3960	0	-7274	-9140	-11313	-11742
3990	0	-7136	-8967	-11098	-11519
4020	0	-6998	-8793	-10883	-11296
4050	0	-6860	-8619	-10669	-11073
4080	0	-6722	-8446	-10454	-10850
4110	0	-6584	-8272	-10239	-10627
4140	0	-6446	-8099	-10024	-10404
4170	0	-6308	-7925	-9809	-10182
4200	0	-6169	-7752	-9594	-9959
4230	0	-6031	-7578	-9380	-9736
4260	0	-5893	-7405	-9165	-9513
4290	0	-5755	-7231	-8950	-9290
4320	0	-5617	-7057	-8735	-9067
4350	0	-5479	-6884	-8520	-8844
4380	0	-5341	-6710	-8305	-8621
4410	0	-5202	-6537	-8091	-8398
4440	0	-5064	-6363	-7876	-8175
4470	0	-4926	-6190	-7661	-7952
4500	0	-4788	-6016	-7446	-7729
4530	0	-4650	-5842	-7231	-7506
4560	0	-4512	-5669	-7017	-7283
4590	0	-4374	-5495	-6802	-7060
4620	0	-4235	-5322	-6587	-6837
4650	0	-4097	-5148	-6372	-6614
4680	0	-3959	-4975	-6157	-6391
4710	0	-3821	-4801	-5942	-6168
4740	0	-3683	-4628	-5728	-5945
4770	0	-3545	-4454	-5513	-5722
4800	0	-3407	-4280	-5298	-5499
4830	0	-3269	-4107	-5083	-5276
4860	0	-3130	-3933	-4868	-5053
4890	0	-2992	-3760	-4653	-4830
4920	0	-2854	-3586	-4439	-4607
4950	0	-2716	-3413	-4224	-4384
4980	0	-2578	-3239	-4009	-4161
5010	0	-2440	-3065	-3794	-3938
5040	0	-2302	-2892	-3579	-3715
5070	0	-2163	-2718	-3365	-3492
5100	0	-2025	-2545	-3150	-3269
5130	0	-1887	-2371	-2935	-3046
5160	0	-1749	-2198	-2720	-2823
5190	0	-1611	-2024	-2505	-2600
5220	0	-1473	-1850	-2290	-2377
5250	0	-1335	-1677	-2076	-2154
5280	0	-1196	-1503	-1861	-1931
5310	0	-1058	-1330	-1646	-1708
5340	0	-920	-1156	-1431	-1485
5370	0	-782	-983	-1216	-1262
5400	0	-644	-809	-1001	-1039
5430	0	-506	-636	-786	-816
5440	0	-444	-555	-705	-735
5450	0	-404	-506	-656	-686
5460	0	0	0	0	0

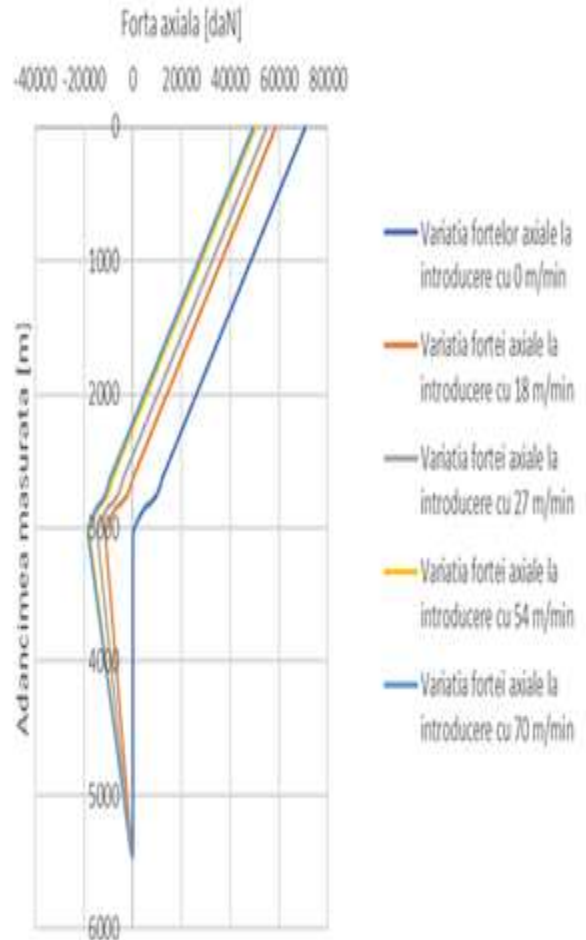


Fig. 4.11. Variația sarcinii axiale la introducere cu diferite viteze, menținându-se constantă viteza de rotație și factorii de frecare

Din figura 4.11 rezultă faptul că la o viteză de rotație constantă a garniturii de foraj, respectiv coeficienți de frecare constanți, cu cât viteza de introducere este mai mare, cu atât valoarea forțelor laterale crește, respectiv

flambajul materialului tubular este mai accentuat. Viteza mare de introducere periclitează, de altfel, și integritatea găurii de sondă, respectiv crește riscul de fisurare al formațiunii prin dreptul căreia se execută manevra de introducere.

Diagrama cumulativă a forțelor axiale pentru scenariile de mai sus este prezentată în figura 4.12.

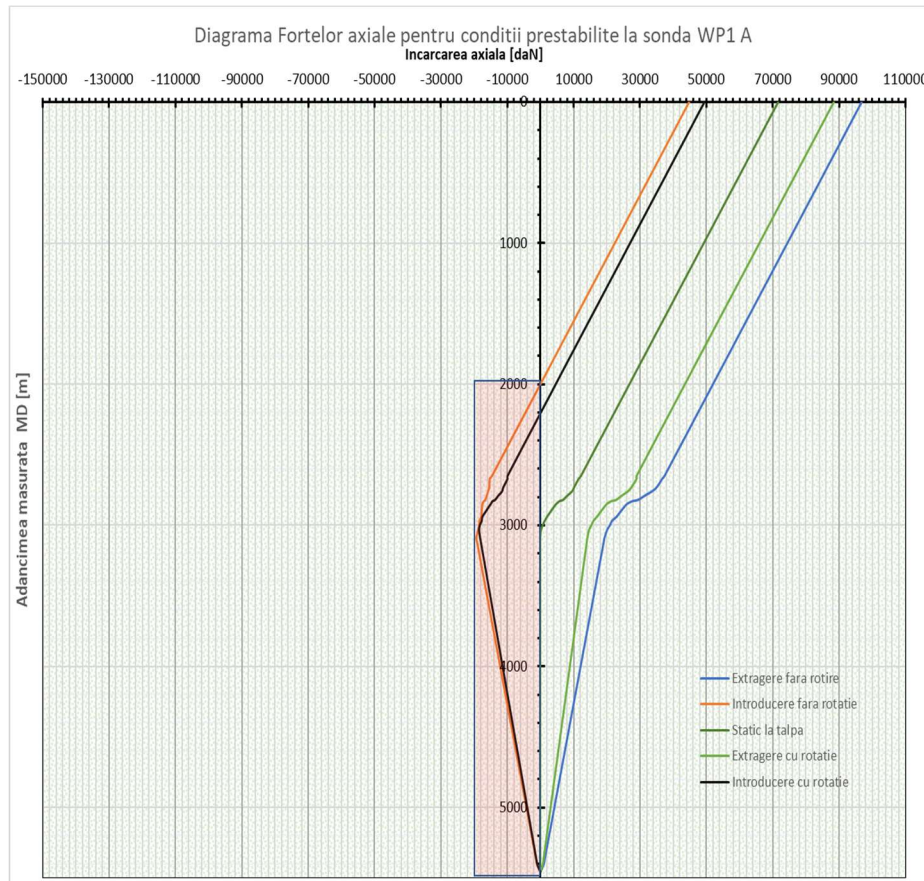


Fig.4.12. Diagrama de forțe axiale pentru condiții prestabilite pentru sonda WP1A

4.7. Analiza diagramelor de moment pentru diferite scenarii de operare

Mișcarea de rotație a garniturii de foraj va induce un moment de torsiune care se cumulează de-a lungul garniturii de foraj de la sapă către suprafață. În ecuația de moment 4.12, pentru găuri lineare, respectiv verticale, tangente și orizontale împreună cu ecuația de moment 4.14 [47] pentru găuri curbe, se introduc datele tehnice de proiectare pentru sonda subiect WP1A, rezultând următoarele scenarii de operații la sondă, reprezentate în tabelul 4.13. Datele din aceste tabele se pot procesa și rezultă diagrama de momente din figura 4.13.

Tabelul 4.13. Momentele de torsiune în diferite scenarii de operare la sonda WP1A

PROIECTAT				(Date calculate)			SCENARII DE OPERARE C											
#	MD	Intaliri	Asimut	TVD	V 30m	Q LB	Moment Extragere cu Rotatie			Moment Static Rotire deasupra taglii			Moment Introducere cu Rotatie			Moment de torsiune Foraj Rotary		
Q	m	g/s	g/s	Z (m)	m	g/s m	Parametri	Ti	ETi	Parametri	Ti	ETi	Parametri	Ti	ETi	Parametri	Ti	ETi
daNm x m																		
1	0	0	0	0,0	0	0	RPM=	0	2615,9	RPM=	0,0	3651,8	RPM=	0,0	2301,6	RPM=	0,0	4051,8
2	20320	0,0	0	20320,0	0,0	0,0	60,0	14,2	2615,9	60,0	5,0	3651,8	60,0	6,8	2301,6	60,0	5,0	4051,8
3	20700	8,33	07,9	20700,0	0,8	8,3	WOB [daN]	5,9	2601,7	WOB [daN]	5,0	3646,8	WOB [daN]	6,8	2294,8	WOB [daN]	5,0	4046,8
4	21800	21,33	07,9	21780,0	2,8	9,0	0,0	3,3	2595,8	0,0	4,9	3641,8	0,0	3,3	2288,1	6000,0	4,9	4041,8
5	27000	80,33	07,9	27000,0	10,0	9,0	ROP [m/min]	5,3	2592,5	ROP [m/min]	7,8	3636,9	ROP [m/min]	5,3	2284,8	ROP [m/min]	7,8	4036,9
6	27900	89,33	07,9	27900,0	10,7	9,0	27,0	6,7	2587,2	0,0	9,8	3629,1	27,0	6,7	2279,5	0,1	9,8	4029,1
7	28300	0,833	07,9	28300,0	0,83	9,0	VM [m/s]	781,4	2580,5	VM [m/s]	1039,5	3619,5	VM [m/s]	600,6	2272,8	VM [m/s]	1039,5	4019,3
8	28800	21,0	07,9	28800,0	2,1	9,7	0,4500	426,7	1799,2	0,0000	583,1	2579,8	0,4500	380,9	1672,2	0,0017	583,1	2979,8
9	29300	2,8	07,9	29300,0	0,83	9,8	Vr [m/s]=	232,0	1372,5	Vr [m/s]=	326,0	1996,7	Vr [m/s]=	184,0	1291,3	Vr [m/s]=	326,0	2396,7
10	29800	3,3	07,9	29800,0	0,83	1,0	0,42	126,0	1140,4	0,42	180,9	1670,7	0,42	101,9	1107,3	0,42	180,9	2070,7
11	29900	30,0	07,9	29900,0	3,0	1,1	ψ=	68,2	1014,4	ψ=	99,3	1489,8	ψ=	64,9	1005,4	ψ=	99,3	1889,7
12	29900	0,8	07,9	29900,0	0,83	1,1	0,8224485	36,8	946,2	0,0000399	53,9	1390,5	0,8224485	34,2	940,5	0,0039888	53,9	1790,5
13	29700	0,833	07,9	29700,0	0,83	0,1	COS(ψ) =	19,5	909,4	COS(ψ) =	28,9	1336,6	COS(ψ) =	16,5	906,3	COS(ψ) =	28,9	1736,6
14	30000	7,0	07,9	29980,0	7,0	0,0	0,68042896	10,4	889,8	1,00000000	15,3	1307,8	0,68042896	10,4	889,8	0,99999204	15,3	1707,7
15	30800	80,33	07,9	30800,0	80,7	0,0	SIN(ψ) =	4,6	879,5	SIN(ψ) =	6,7	1292,5	SIN(ψ) =	4,6	879,5	SIN(ψ) =	6,7	1692,5
16	30800	80,33	07,9	30800,0	109,0	0,0	0,73	4,6	874,9	0,00	6,8	1285,8	0,73	4,6	874,9	0,00	6,8	1685,8
17	30800	0,0	00,0	30800,0	0,0	0,0		10,7	870,3		15,8	1279,0		10,7	870,3	T la sapa [daNm]	15,8	1679,0
18	31300	WD	00,0	31300,0	1,8	0,0		10,7	859,6		15,8	1263,3		10,7	859,6	400	15,8	1663,3
19	31300	WD	00,0	31300,0	1,8	0,0		10,7	848,8		15,8	1247,5		10,7	848,8		15,8	1647,5
20	31800	WD	00,0	31800,0	1,8	0,0		10,7	838,1		15,8	1231,8		10,7	838,1		15,8	1631,8
21	32100	WD	00,0	32100,0	1,8	0,0		10,7	827,4		15,8	1216,0		10,7	827,4		15,8	1616,0
22	32400	WD	00,0	32400,0	1,8	0,0		10,7	816,7		15,8	1200,3		10,7	816,7		15,8	1600,3
23	32700	WD	00,0	32700,0	1,8	0,0		10,7	806,0		15,8	1184,5		10,7	806,0		15,8	1584,5
24	33000	WD	00,0	33000,0	1,8	0,0		10,7	795,3		15,8	1168,8		10,7	795,3		15,8	1568,8
25	33300	WD	00,0	33300,0	1,8	0,0		10,7	784,5		15,8	1153,0		10,7	784,5		15,8	1553,0
26	33600	WD	00,0	33600,0	1,8	0,0		10,7	773,8		15,8	1137,3		10,7	773,8		15,8	1537,3
27	33900	WD	00,0	33900,0	1,8	0,0		10,7	763,1		15,8	1121,5		10,7	763,1		15,8	1521,5
28	34300	WD	00,0	34300,0	1,8	0,0		10,7	752,4		15,8	1105,8		10,7	752,4		15,8	1505,8
29	34300	WD	00,0	34300,0	1,8	0,0		10,7	741,7		15,8	1090,0		10,7	741,7		15,8	1490,0
30	34300	WD	00,0	34300,0	1,8	0,0		10,7	731,0		15,8	1074,3		10,7	731,0		15,8	1474,3
31	34300	WD	00,0	34300,0	1,8	0,0		10,7	720,2		15,8	1058,5		10,7	720,2		15,8	1458,5
32	34300	WD	00,0	34300,0	1,8	0,0		10,7	709,5		15,8	1042,8		10,7	709,5		15,8	1442,8
33	34700	WD	00,0	34700,0	1,8	0,0		10,7	698,8		15,8	1027,0		10,7	698,8		15,8	1427,0
34	35000	WD	00,0	35000,0	1,8	0,0		10,7	688,1		15,8	1011,3		10,7	688,1		15,8	1411,3
35	35300	WD	00,0	35300,0	1,8	0,0		10,7	677,4		15,8	995,5		10,7	677,4		15,8	1395,5
36	35600	WD	00,0	35600,0	1,8	0,0		10,7	666,7		15,8	979,8		10,7	666,7		15,8	1379,8
37	35900	WD	00,0	35900,0	1,8	0,0		10,7	655,9		15,8	964,0		10,7	655,9		15,8	1364,0
38	37300	WD	00,0	37300,0	1,8	0,0		10,7	645,2		15,8	948,3		10,7	645,2		15,8	1348,3
39	37300	WD	00,0	37300,0	1,8	0,0		10,7	634,5		15,8	932,5		10,7	634,5		15,8	1332,5
40	37300	WD	00,0	37300,0	1,8	0,0		10,7	623,8		15,8	916,8		10,7	623,8		15,8	1316,8
41	38100	WD	00,0	38100,0	1,8	0,0		10,7	613,1		15,8	901,0		10,7	613,1		15,8	1301,0
42	38400	WD	00,0	38400,0	1,8	0,0		10,7	602,4		15,8	885,3		10,7	602,4		15,8	1285,3
43	38700	WD	00,0	38700,0	1,8	0,0		10,7	591,6		15,8	869,5		10,7	591,6		15,8	1269,5
44	39000	WD	00,0	39000,0	1,8	0,0		10,7	580,9		15,8	853,8		10,7	580,9		15,8	1253,8
45	39300	WD	00,0	39300,0	1,8	0,0		10,7	570,2		15,8	838,0		10,7	570,2		15,8	1238,0
46	39600	WD	00,0	39600,0	1,8	0,0		10,7	559,5		15,8	822,3		10,7	559,5		15,8	1222,3
47	39900	WD	00,0	39900,0	1,8	0,0		10,7	548,8		15,8	806,5		10,7	548,8		15,8	1206,5
48	40300	WD	00,0	40300,0	1,8	0,0		10,7	538,1		15,8	790,8		10,7	538,1		15,8	1190,8
49	40300	WD	00,0	40300,0	1,8	0,0		10,7	527,3		15,8	775,0		10,7	527,3		15,8	1175,0
50	40300	WD	00,0	40300,0	1,8	0,0		10,7	516,6		15,8	759,3		10,7	516,6		15,8	1159,3
51	41100	WD	00,0	41100,0	1,8	0,0		10,7	505,9		15,8	743,5		10,7	505,9		15,8	1143,5
52	41400	WD	00,0	41400,0	1,8	0,0		10,7	495,2		15,8	727,8		10,7	495,2		15,8	1127,8
53	41700	WD	00,0	41700,0	1,8	0,0		10,7	484,5		15,8	712,0		10,7	484,5		15,8	1112,0
54	41900	WD	00,0	41900,0	1,8	0,0		10,7	473,8		15,8	696,3		10,7	473,8		15,8	1096,3
55	42200	WD	00,0	42200,0	1,8	0,0		10,7	463,0		15,8	680,5		10,7	463,0		15,8	1080,5
56	42500	WD	00,0	42500,0	1,8	0,0		10,7	452,3		15,8	664,8		10,7	452,3		15,8	1064,8
57	42800	WD	00,0	42800,0	1,8	0,0		10,7	441,6		15,8	649,0		10,7	441,6		15,8	1049,0
58	43100	WD	00,0	43100,0	1,8	0,0		10,7	430,9		15,8	633,3		10,7	430,9		15,8	1033,3
59	43300	WD	00,0	43300,0	1,8	0,0		10,7	420,2		15,8	617,5		10,7	420,2		15,8	1017,5
60	43600	WD	00,0	43600,0	1,8	0,0		10,7	409,5		15,8	601,8		10,7	409,5		15,8	1001,8
61	44100	WD	00,0	44100,0	1,8	0,0		10,7	398,7		15,8	586,0		10,7	398,7		15,8	986,0
62	44400	WD	00,0	44400,0	1,8	0,0		10,7	388,0		15,8	570,3		10,7	388,0		15,8	970,3
63	44700	WD	00,0	44700,0	1,8	0,0		10,7	377,3		15,8	554,5		10,7	377,3		15,8	954,5
64	45000	WD	00,0	45000,0	1,8	0,0		10,7	366,6		15,8	538,8		10,7	366,6		15,8	938,8
65	45300	WD	00,0	45300,0	1,8	0,0		10,7	355,9		15,8	523,0		10,7	355,9		15,8	923,0
66	45600	WD	00,0	45600,0	1,8	0,0		10,7	345,2		15,8	507,3		10,7	345,2		15,8	907,2
67	45900	WD	00,0	45900,0	1,8	0,0		10,7	334,4		15,8	491,5		10,7	334,4		15,8	891,5
68	46200	WD	00,0	46200,0	1,8	0,0		10,7	323,7		15,8	475,8		10,7	323,7		15,8	875,7
69	46300	WD	00,0	46300,0	1,8	0,0		10,7	313,0		15,8	460,0		10,7	313,0		15,8	860,0
70	46300	WD	00,0	46300,0	1,8	0,0		10,7	302,3		15,8	444,3		10,7	302,3		15,8	844,2
71	47100	WD	00,0	47100,0	1,8	0,0		10,7	291,6		15,8							

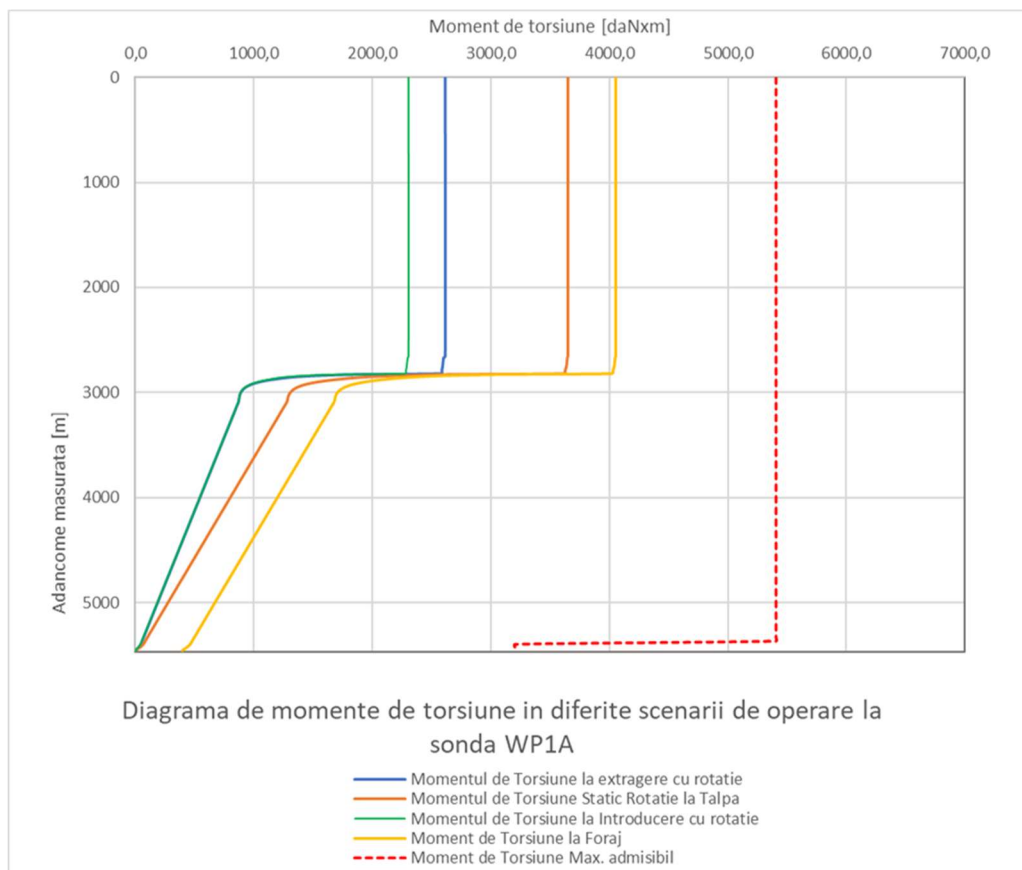


Fig.4.13. Diagrama de momente în diferite scenarii la sonda WP1 A

Note:

- Valorile maxime ale momentului de torsiune, indiferent de scenariu și parametri aplicați, trebuie să fie inferior momentului de înșurubare optim pentru racordurile materialului tubular utilizat. Momentul maxim de torsiune în garnitura de foraj apare în scenariul „Foraj Rotary”;
- Momentul de torsiune în scenariul „Rotire sapă deasupra tălpii” este o valoare de referință și calibrare a parametrilor înainte de a reîncepe procesul de foraj;
- Momentul de torsiune la introducere cu rotație este mai mic decât momentul de torsiune la extragere cu rotație;
- Executarea calculelor și interpretarea diagramelor de momente se efectuează la coeficienți de frecare constanți, viteze egale la manevră în sens descendent/ ascendent și viteze de rotație ale garniturii egale atât în sens ascendent cât și în sens descendent;
- Analiza curbilor pentru momentele de torsiune optimizează alegerea tipurilor de racorduri speciale ale prăjinilor de foraj;
- Alura curbilor momentelor de torsiune este sensibilă la o multitudine de parametri.; nu există curbe standard.

4.7.1. Analiza momentului de torsiune la extragere cu rotație

În tabelul 4.14 și figura 4.14 este reprezentat un studiu de sensibilitate la extragere pentru momente, la diferite viteze de rotație RPM, păstrându-se constanți viteza ascensională (V_m - viteza de manevră) și factorii de frecare.

Tabelul 4.14. Valori ale momentelor de torsiune la extragere cu viteză de manevră $V_m = ct.$

MD [m]	RPM			
	40	60	80	100
Valori Moment la Extragere [daN x m]				
0	2715	2616	2358	2142
2650	2715	2616	2358	2142
2670	2703	2602	2343	2128
2730	2698	2596	2337	2121
2760	2696	2592	2333	2117
2790	2691	2587	2327	2110
2820	2686	2581	2320	2102
2830	1694	1799	1763	1704
2850	1188	1372	1437	1458
2880	932	1140	1248	1306
2910	803	1014	1139	1212
2940	737	946	1075	1155
2970	705	909	1038	1120
3000	688	890	1017	1098
3030	680	879	1005	1086
3060	677	875	1000	1080
3090	673	870	995	1074
3120	665	860	983	1061
3150	657	849	970	1048
3180	648	838	958	1035
3210	640	827	946	1021
3240	632	817	934	1008
3270	623	806	921	995
3300	615	795	909	982
3330	607	785	897	968
3360	599	774	885	955
3390	590	763	872	942
3420	582	752	860	929
3450	574	742	848	916
3480	565	731	836	902
3510	557	720	823	889
3540	549	710	811	876
3570	541	699	799	863
3600	532	688	787	849
3630	524	677	774	836
3660	516	667	762	823
3690	507	656	750	810
3720	499	645	738	796
3750	491	635	725	783
3780	483	624	713	770
3810	474	613	701	757
3840	466	602	689	744
3870	458	592	676	730
3900	449	581	664	717
3930	441	570	652	704
3960	433	559	640	691
3990	424	549	627	677
4020	416	538	615	664
4050	408	527	603	651
4080	400	517	591	638
4110	391	506	578	624
4140	383	495	566	611
4170	375	484	554	598
4200	366	474	542	585
4230	358	463	529	572
4260	350	452	517	558
4290	342	442	505	545
4320	333	431	493	532
4350	325	420	480	519
4380	317	409	468	505
4410	308	399	456	492
4440	300	388	444	479
4470	292	377	431	466
4500	284	367	419	453
4530	275	356	407	439
4560	267	345	395	426
4590	259	334	382	413
4620	250	324	370	400
4650	242	313	358	386
4680	234	302	346	373
4710	226	292	333	360
4740	217	281	321	347
4770	209	270	309	333
4800	201	259	297	320
4830	192	249	284	307
4860	184	238	272	294
4890	176	227	260	281
4920	168	217	248	267
4950	159	206	235	254
4980	151	195	223	241
5010	143	184	211	228
5040	134	174	199	214
5070	126	163	186	201
5100	118	152	174	188
5130	109	142	162	175
5160	101	131	150	161
5190	93	120	137	148
5220	85	109	125	135
5250	76	99	113	122
5280	68	88	101	109
5310	60	77	88	95
5340	51	67	76	82
5370	43	56	64	69
5400	35	45	52	56
5430	20	25	29	31
5440	13	17	20	21
5450	6	7	8	9
5460	0	0	0	0

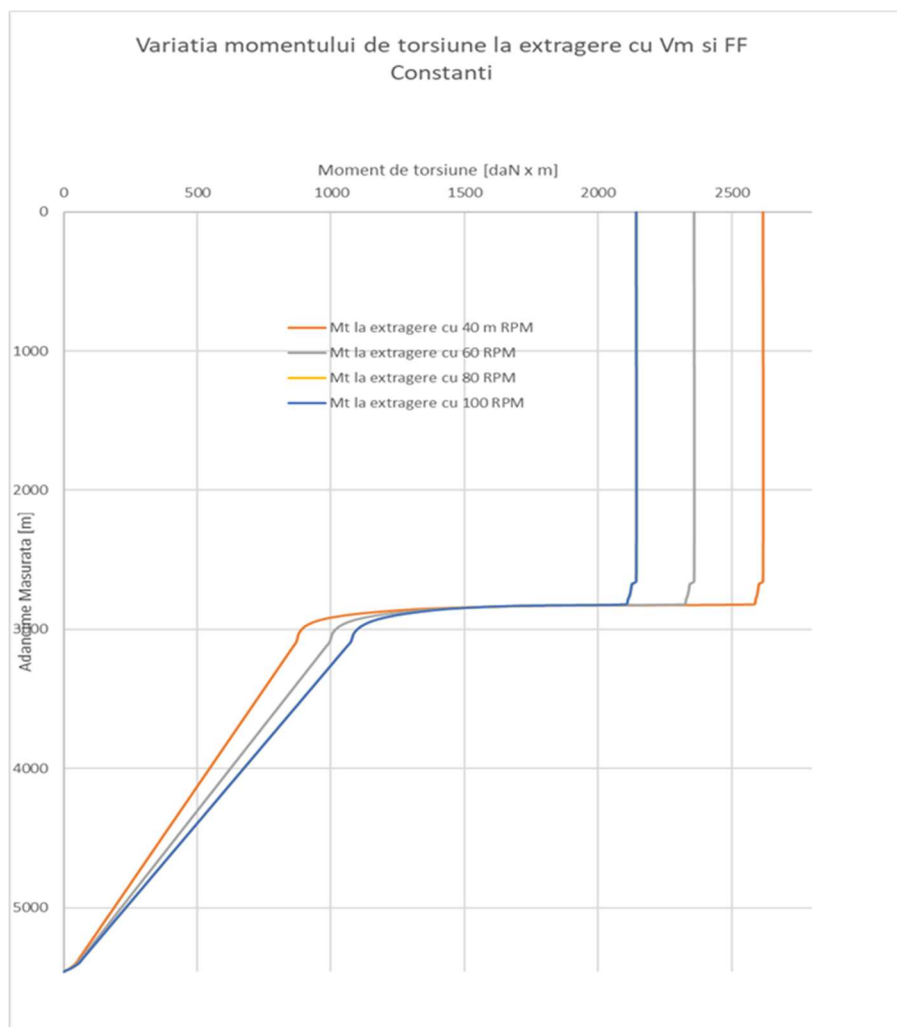


Fig. 4.14. Variația momentului de torsiune la extragere V_m și $FF = Ct.$

În tabelul 4.15 și figura 4.15 sunt studiate valorile momentelor de torsiune la extragere, păstrându-se constantă viteza de rotație RPM și factorii de frecare, variindu-se vitezele de extragere. Din figura 4.15 rezultă că momentul de torsiune descrește odată cu creșterea vitezei de rotație și creșterea vitezei de manevră la extragere. Aceasta explică,

în fond, modul în care se realizează corectarea găurii în mod ascendent (*back-reaming*), atunci când instalația de foraj este prevăzută cu TDS (*Top Drive System*). Viteza de extragere este limitată de fenomenul de pistonare.

Tabelul 4.15. Momente de torsiune la extragere cu RPM ct.

MD [m]	Vm (RPM=ct)			
	27 m/min	54 m/min	70 m/min	100 m/min
Valori Moment la Extragere [daN x m]				
0	2616	2521	2213	1724
2650	2616	2521	2213	1724
2670	2602	2511	2205	1718
2730	2596	2507	2202	1715
2760	2592	2505	2200	1714
2790	2587	2502	2198	1712
2820	2581	2498	2194	1710
2830	1799	1501	1281	975
2850	1372	1009	839	625
2880	1140	768	626	459
2910	1014	650	524	380
2940	946	592	475	343
2970	909	564	452	326
3000	890	551	441	318
3030	879	544	436	314
3060	875	541	434	313
3090	870	539	431	311
3120	860	532	426	307
3150	849	525	421	303
3180	838	519	415	300
3210	827	512	410	296
3240	817	505	405	292
3270	806	499	399	288
3300	795	492	394	284
3330	785	486	389	280
3360	774	479	383	277
3390	763	472	378	273
3420	752	466	373	269
3450	742	459	368	265
3480	731	452	362	261
3510	720	446	357	257
3540	710	439	352	254
3570	699	432	346	250
3600	688	426	341	246
3630	677	419	336	242
3660	667	413	330	238
3690	656	406	325	234
3720	645	399	320	231
3750	635	393	314	227
3780	624	386	309	223
3810	613	379	304	219
3840	602	373	298	215
3870	592	366	293	211
3900	581	360	288	208
3930	570	353	283	204
3960	559	346	277	200
3990	549	340	272	196
4020	538	333	267	192
4050	527	326	261	188
4080	517	320	256	185
4110	506	313	251	181
4140	495	306	245	177
4170	484	300	240	173
4200	474	293	235	169
4230	463	287	229	165
4260	452	280	224	162
4290	442	273	219	158
4320	431	267	214	154
4350	420	260	208	150
4380	409	253	203	146
4410	399	247	198	143
4440	388	240	192	139
4470	377	233	187	135
4500	367	227	182	131
4530	356	220	176	127
4560	345	214	171	123
4590	334	207	166	120
4620	324	200	160	116
4650	313	194	155	112
4680	302	187	150	108
4710	292	180	144	104
4740	281	174	139	100
4770	270	167	134	97
4800	259	161	129	93
4830	249	154	123	89
4860	238	147	118	85
4890	227	141	113	81
4920	217	134	107	77
4950	206	127	102	74
4980	195	121	97	70
5010	184	114	91	66
5040	174	107	86	62
5070	163	101	81	58
5100	152	94	75	54
5130	142	88	70	51
5160	131	81	65	47
5190	120	74	60	43
5220	109	68	54	39
5250	99	61	49	35
5280	88	54	44	31
5310	77	48	38	28
5340	67	41	33	24
5370	56	35	28	20
5400	45	28	22	16
5430	25	16	13	9
5440	17	11	8	6
5450	7	4	4	3
5460	0	0	0	0

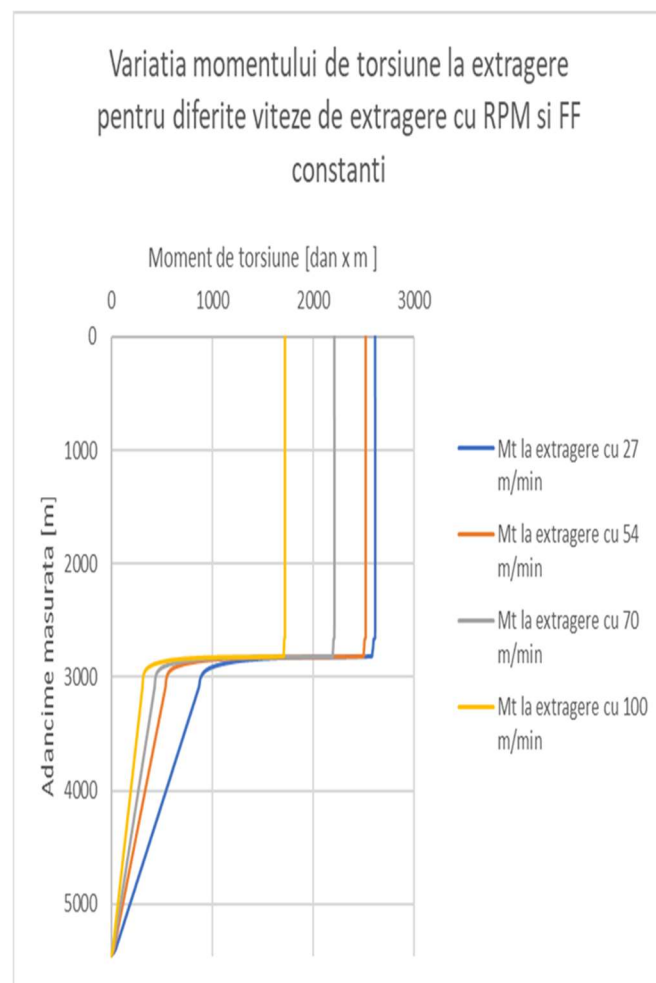


Fig. 4.15. Variația momentului de torsiune la extragere
RPM și FF=ct

4.7.2. Analiza momentului de torsiune la introducere cu rotație

În tabelul 4.16 și figura 4.16 este reprezentat un studiu de senzitivitate la introducere pentru momentele de torsiune la diferite viteze de rotație RPM păstrându-se constantă viteza de manevră (descendentă) (V_m -viteza de manevră) și factorii de frecare.

Tabelul 4.16. Momente de torsiune la extragere cu FF și $V_m = ct.$

MD [m]	RPM ($V_m = ct.$)			
	40	60	80	100
Valori Moment la Introducere [daN x m]				
0	2081	2302	2440	2528
2650	2081	2302	2440	2528
2670	2074	2295	2434	2522
2730	2068	2288	2427	2515
2760	2065	2285	2423	2511
2790	2061	2279	2417	2504
2820	2056	2273	2409	2496
2830	1456	1672	1809	1895
2850	1086	1291	1421	1503
2880	902	1107	1237	1319
2910	800	1005	1135	1218
2940	738	940	1069	1150
2970	705	906	1034	1115
3000	688	890	1017	1098
3030	680	879	1005	1086
3060	677	875	1000	1080
3090	673	870	995	1074
3120	665	860	983	1061
3150	657	849	970	1048
3180	648	838	958	1035
3210	640	827	946	1021
3240	632	817	934	1008
3270	623	806	921	995
3300	615	795	909	982
3330	607	785	897	968
3360	599	774	885	955
3390	590	763	872	942
3420	582	752	860	929
3450	574	742	848	916
3480	565	731	836	902
3510	557	720	823	889
3540	549	710	811	876
3570	541	699	799	863
3600	532	688	787	849
3630	524	677	774	836
3660	516	667	762	823
3690	507	656	750	810
3720	499	645	738	796
3750	491	635	725	783
3780	483	624	713	770
3810	474	613	701	757
3840	466	602	689	744
3870	458	592	676	730
3900	449	581	664	717
3930	441	570	652	704
3960	433	559	640	691
3990	424	549	627	677
4020	416	538	615	664
4050	408	527	603	651
4080	400	517	591	638
4110	391	506	578	624
4140	383	495	566	611
4170	375	484	554	598
4200	366	474	542	585
4230	358	463	529	572
4260	350	452	517	558
4290	342	442	505	545
4320	333	431	493	532
4350	325	420	480	519
4380	317	409	468	505
4410	308	399	456	492
4440	300	388	444	479
4470	292	377	431	466
4500	284	367	419	453
4530	275	356	407	439
4560	267	345	395	426
4590	259	334	382	413
4620	250	324	370	400
4650	242	313	358	386
4680	234	302	346	373
4710	226	292	333	360
4740	217	281	321	347
4770	209	270	309	333
4800	201	259	297	320
4830	192	249	284	307
4860	184	238	272	294
4890	176	227	260	281
4920	168	217	248	267
4950	159	206	235	254
4980	151	195	223	241
5010	143	184	211	228
5040	134	174	199	214
5070	126	163	186	201
5100	118	152	174	188
5130	109	142	162	175
5160	101	131	150	161
5190	93	120	137	148
5220	85	109	125	135
5250	76	99	113	122
5280	68	88	101	109
5310	60	77	88	95
5340	51	67	76	82
5370	43	56	64	69
5400	35	45	52	56
5430	20	25	29	31
5440	13	17	20	21
5450	6	7	8	9
5460	0	0	0	0

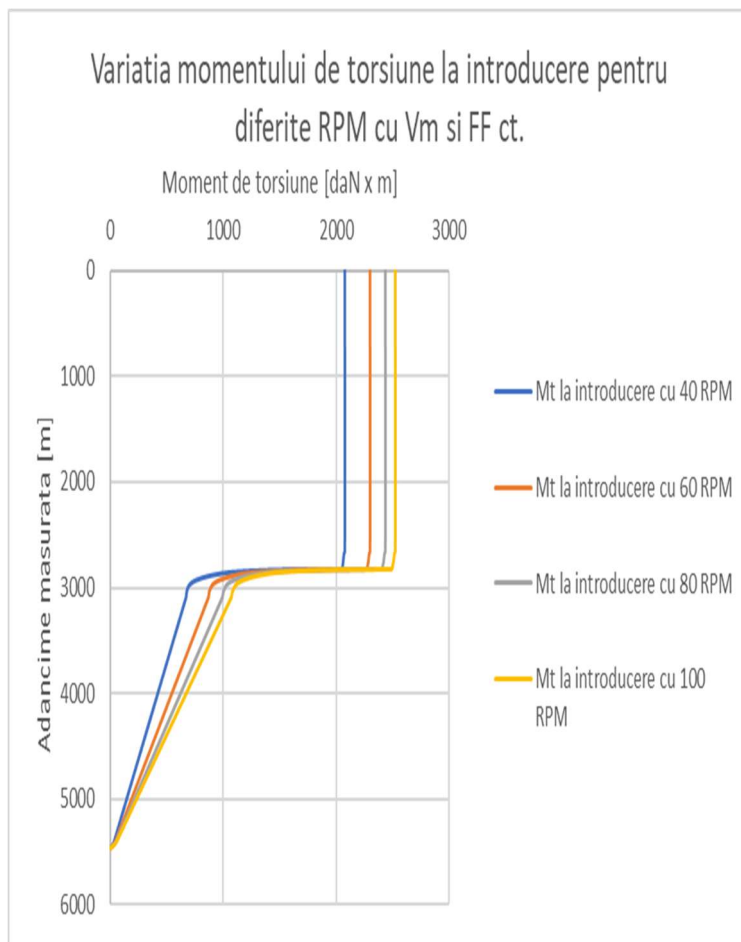


Fig. 4.16. Variația momentului de torsiune la introducere $V_m = ct$

În mod similar, în tabelul 4.17 și figura 4.17 este reprezentat un studiu de sensibilitate la introducere, pentru momente de torsiune, la diferite viteze de manevră V_m (descendente), păstrându-se constanți RPM și factorii de frecare.

Tabelul 4.17. Momente de torsiune la introducere cu RPM și FF constanți

MD [m]	V _m (RPM=ct)			
	27 m/min	54 m/min	80 m/min	100 m/min
Valori Moment la introducere [daN x m]				
0	2302	1930	1754	1673
2650	2302	1930	1754	1673
2670	2295	1923	1747	1667
2730	2288	1917	1741	1660
2760	2285	1914	1739	1659
2790	2279	1911	1737	1657
2820	2273	1907	1734	1655
2830	1672	1308	1137	1058
2850	1291	946	783	709
2880	1107	762	599	525
2910	1005	660	498	423
2940	940	599	438	365
2970	906	567	407	334
3000	890	551	391	318
3030	879	544	387	314
3060	875	541	384	313
3090	870	539	382	311
3120	860	532	378	307
3150	849	525	373	303
3180	838	519	368	300
3210	827	512	364	296
3240	817	505	359	292
3270	806	499	354	288
3300	795	492	350	284
3330	785	486	345	280
3360	774	479	340	277
3390	763	472	335	273
3420	752	466	331	269
3450	742	459	326	265
3480	731	452	321	261
3510	720	446	317	257
3540	710	439	312	254
3570	699	432	307	250
3600	688	426	302	246
3630	677	419	298	242
3660	667	413	293	238
3690	656	406	288	234
3720	645	399	284	231
3750	635	393	279	227
3780	624	386	274	223
3810	613	379	269	219
3840	602	373	265	215
3870	592	366	260	211
3900	581	360	255	208
3930	570	353	251	204
3960	559	346	246	200
3990	549	340	241	196
4020	538	333	236	192
4050	527	326	232	188
4080	517	320	227	185
4110	506	313	222	181
4140	495	306	218	177
4170	484	300	213	173
4200	474	293	208	169
4230	463	287	203	165
4260	452	280	199	162
4290	442	273	194	158
4320	431	267	189	154
4350	420	260	185	150
4380	409	253	180	146
4410	399	247	175	143
4440	388	240	171	139
4470	377	233	166	135
4500	367	227	161	131
4530	356	220	156	127
4560	345	214	152	123
4590	334	207	147	120
4620	324	200	142	116
4650	313	194	138	112
4680	302	187	133	108
4710	292	180	128	104
4740	281	174	123	100
4770	270	167	119	97
4800	259	161	114	93
4830	249	154	109	89
4860	238	147	105	85
4890	227	141	100	81
4920	217	134	95	77
4950	206	127	90	74
4980	195	121	86	70
5010	184	114	81	66
5040	174	107	76	62
5070	163	101	72	58
5100	152	94	67	54
5130	142	88	62	51
5160	131	81	57	47
5190	120	74	53	43
5220	109	68	48	39
5250	99	61	43	35
5280	88	54	39	31
5310	77	48	34	28
5340	67	41	29	24
5370	56	35	25	20
5400	45	28	20	16
5430	25	16	11	9
5440	17	11	7	6
5450	7	4	3	3
5460	0	0	0	0

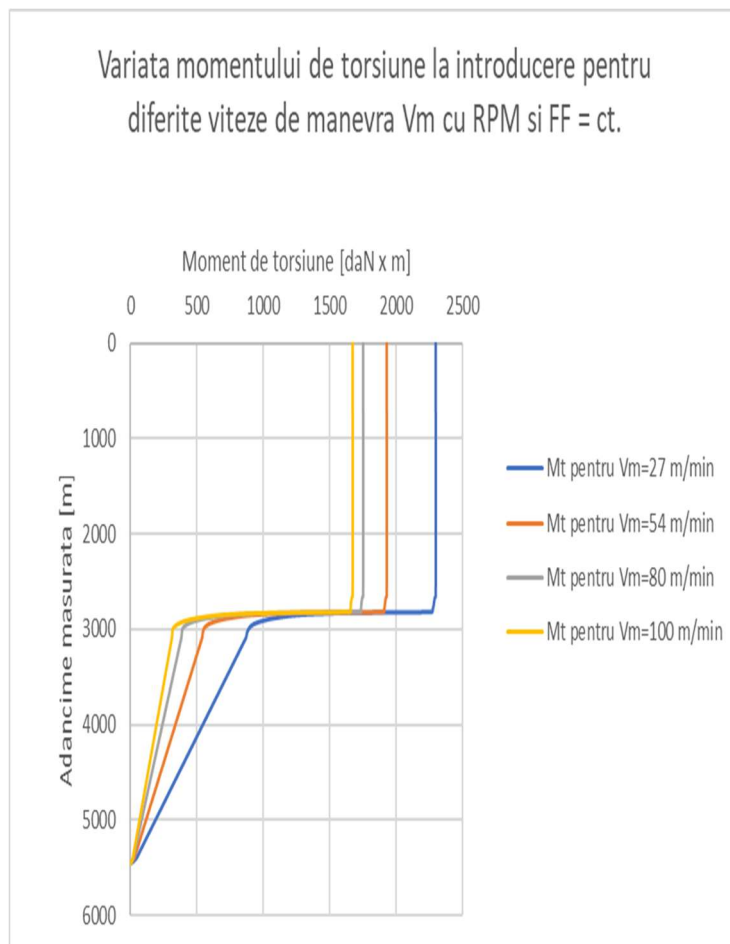


Fig. 4.17. Variația momentului de torsiune la introducere RPM și FF=ct

Note. 1) Din diagramele 4.16 și 4.17 se observă că momentul de torsiune la introducere crește odată cu creșterea valorilor RPM și scade odată cu creșterea vitezei de manevră în sens descendent ;

2) Viteza de manevră mare în sens descendent poate genera fisurarea formațiunilor geologice.

5.

Uzura coloanelor de burlane

5.1. Generalități

Uzura coloanelor este un fenomen localizat, cauzat de interacțiunea garniturii de foraj în rotație, cu suprafața interioară a coloanei de burlane în care se rotește această garnitură. Mărimea presiunii de contact dintre suprafața garniturii de foraj și a suprafeței interioare a coloanei de burlane este cel mai important factor care influențează uzura coloanei de burlane [48]. Această uzură poate fi cuantificată prin măsurarea cantității de metal pierdută prin uzură, de suprafața interioară a coloanei de burlane, sau prin localizarea directă în anumite puncte a reducerii grosimii de perete a coloanei de burlane supusă uzurii.

Reducerea grosimii de perete a burlanelor are drept consecințe directe, reducerea valorilor presiunilor admisibile interioare și exterioare pentru burlanele uzate și, de asemenea, reprezintă concentratori de coroziune [48]. Cauzele uzurii și fizica acestui fenomen au fost studiate pe larg, existând surse în literatura de petrol și gaze ca, de exemplu, studiile lui *Bradley 1975, Fontenot and McEver 1975, True and Weiner 1975 și alții* [49]. Principalele concluzii ale acestor studii indică faptul că uzura datorată interacțiunii prăjinii / coloană arată o schimbare calitativă în mecanismul uzurii, de la uzura abrazivă la uzura adezivă la o presiune de contact de circa 250 psi (17,2 Bar) – Williamson 1981 [49].

Uzura abrazivă apare atunci când o suprafață dură alunecă pe o suprafață mai puțin dură [49]. Uzura adezivă apare atunci când două suprafețe sunt în contact de frecare cu, sau fără lubricitate. Adeziunea sau lipirea apare la nivelul vârfurilor ascuțite din suprafețe, fragmentele de material fiind extrase dintr-o suprafață și lipite de cealaltă. Uzura adezivă este mai severă decât uzura abrazivă [49]. În general, volumul de material îndepărtat prin uzură depinde de forțele de contact la nivelul suprafețelor, duritatea suprafețelor, lungimea de contact a celor două suprafețe și coeficientul de frecare dintre suprafețe [49].

Uzura coloanelor de burlane, cu toate cele ce rezultă în urma acestui fenomen, respectiv reducerea valorilor presiunilor admisibile interioare și exterioare (colaps) este un fenomen care se manifestă în procesul de construcție al sondelor. Deși consecințele pot avea impact major asupra ciclului de viață al sondei, nu există o metodă sigură/ exactă și standardizată pentru predicția uzurii coloanelor de burlane. Există însă câteva modele teoretice care pot fi folosite cu succes în estimarea valorii uzurii și subsecvent, reducerea valorilor de presiuni admisibile interioare și exterioare [49].

Factorii determinanți care generează uzura coloanelor (figura 5.1) de burlane sunt:

- viteza de rotație a garniturii de foraj în interiorul coloanei;
- diametrul exterior al racordului prăjinii de foraj;
- forța de tracțiune în garnitura de foraj în secțiunea analizată;
- forța de compresiune în garnitura de foraj în secțiunea analizată;
- forța laterală dezvoltată în racordul special al prăjinii de foraj;
- diametrul interior a coloanei de burlane;
- viteza de penetrare;
- înclinarea găurii de sondă;
- intensitatea de deviere a găurii de sondă (*Dog Leg Severity*);
- coeficientul de uzură pentru coloana respectivă;
- duritatea și rugozitatea racordurilor prăjinilor de foraj.

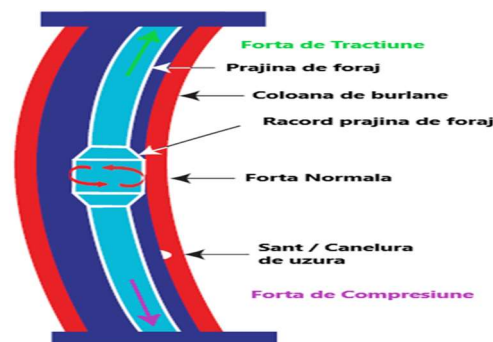


Fig. 5.1. Factori determinați generatori de uzură ai coloanei

La sondele direcționale, zonele cu uzuri accentuate vor fi generate în intervalele cuprinse între punctul de inițiere a devierii (KOP) și punctul unde creșterea înclinării se considera încheiată (EOB); de asemeni, zone de uzură accentuate vor apare în toate punctele unde valorile intensității de deviere (DLS) sunt semnificative.

Poziția și magnitudinea uzurii volumetrice ce apare în coloana de burlane poate fi estimată prin calcularea energiei disipate prin rotația racordurilor speciale în interiorul coloanei de burlane în zonele propice apariției uzurii și raportând această cantitate de energie la cantitatea de energie necesară pentru uzura unei unități de volum din peretele coloanei de burlane în zona de studiu [48].

Uzura volumetrică este proporțională cu un coeficient de uzură determinat empiric, definit ca și coeficient de frecare împărțit la volumul de material din coloană înlăturat prin uzură, pe unitatea de energie consumată [48]. Coeficientul de uzură depinde de [48]: proprietățile fluidului de foraj; lubrifanții existenți în sistem; solidele din fluidul de foraj; rugozitatea suprafeței racordurilor speciale; duritatea racordurilor speciale. Acțiunea chimică generată de unele gaze cum ar fi H₂S, CO₂ și O₂ tinde să reducă duritatea suprafeței de metal, și prin aceasta contribuind semnificativ asupra vitezei de uzură.

5.2. Estimarea calitativă a uzurii

Bazele modelului de uzură adezivă, ca rezultat în urma acțiunii racordurilor prăjinilor de foraj pe suprafața interioară a coloanei de burlane, a fost dezvoltat de Whyte și Dawon în 1985; Archard 1953 [49] și compară energia necesară pentru îndepărtarea unei cantități oarecare de metal de pe suprafața interioară a coloanei de burlane, cu cantitatea totală de lucru mecanic ce trebuie efectuat.

Companiile operatoare pentru țigări și gaze au dezvoltat propriile experimente și teste specifice de laborator, așa încât să facă funcțional acest model matematic teoretic, cu rezultate practice imediate. Volumul de material din coloana de burlane înlăturat prin uzură de către racordul special al prăjinii de foraj este definit prin ecuația [49]

$$K = \frac{\text{Energia absorbită în uzura}}{\text{Total lucru mecanic efectuat}} = \frac{V H}{\mu F_n S} \quad (5.1)$$

în care:

K este eficiența uzurii;

F - coeficientul de frecare/ energia specifică;

V - volumul de metal înlăturat de pe suprafața interioară uzată a burlanelor [in³/ft];

H - duritatea Brinnell;

μ - coeficientul de frecare dintre suprafețele de uzură;

S - distanța de contact prin alunecare parcursă de racordul prăjinii de foraj în timpul forajului cu rotație ;

F_n - forța normală de contact dintre suprafețe.

Valorile K și H (tabelul 5.1) sunt date pentru diferite tipuri de oțel din care sunt fabricate burlanele de tubaj, sau F, pentru diferite tipuri de fluide de foraj, respectiv pe bază de apă sau pe bază de produse petroliere [49] (sau, în tabelul 5.2, în conformitate cu ENI – Manual pentru proiectarea coloanelor de burlane [48]).

Tabelul 5.1. Proprietățile uzurii la diferite grade de oțel pentru burlane White and Dawson 1985 [48]

PROPRIETĂȚILE UZURII PENTRU DIFERITE GRADE DE OȚEL				
Tip Fluid foraj	Grad oțel	Eficiența uzurii K	K/H [ln ² /lbs]	Duritate H [psi]
Pe baza de apă	K55	0,0001	3,6 ⁻¹⁰	277778
	N80	0,00023	8,1 ⁻¹⁰	283951
	P110	0,00063	1,4 ⁻¹⁰	450000
Pe baza de țigări	K55	0,0006	2,2 ⁻¹⁰	272727
	N80	0,0012	3,9 ⁻¹⁰	307692
	P110	0,0017	4,2 ⁻¹⁰	404762

Tabelul 5.2. Factori de uzură [49]

Fluid foraj	Racord	Factor uzură (F) [E ⁻¹⁰ psi ⁻¹]
Apă + bentonită + barită	Neted	0,5 - 1
Apă + bentonită + Lubricant 2%	Neted	0,5 - 5
Apă + bentonită + Solide forate	Neted	5 - 10
Apă	Neted	10 - 30
Apă + bentonită	Neted	10 - 30
Apă + bentonită + barită	Ușor rugos	20 - 50
Apă + bentonită + barită	Rugos	50 - 150
Apă + bentonită + barită	Foarte rugos	200 - 400

Indiferent care ar fi sursa pentru selectarea factorului de frecare, unitatea sa de măsura este de E^{-10} psi⁻¹, deci ,ca exemplu, un factor de uzură de "8" înseamnă $8 E^{-10}$ psi⁻¹ care se utilizează de fapt în calcule. În modelele pentru predicția uzurii, este foarte importantă alegerea factorului de uzura F.

Ecuatia 5.1 este folosită prin rearanjarea termenilor, astfel ca să se obțină termenul V, adică volumul de material îndepărtat de pe suprafața interioară a burlanelor, din cauza uzurii. În acest scop se fac următoarele notații:

V_z - viteza de penetrare [ft/hr.];

L_h - lungimea găurii de sondă ce urmează a fi săpată (uzual lungimea găurii de producție având tubată coloana intermediară) [ft];

r_{TJ} - raza racordului prăjini foraj Tool Joint Radius [in];

D_{TJ} - diametrul exterior racord prăjină de foraj [in];

L_{TJ} - lungimea unui racord complet prăjină de foraj [ft.];

ω - viteza de rotație a garniturii de foraj rotații pe minut;

DP_{JL} - distanța dintre doua racorduri speciale – lungimea corpului prăjini de foraj [ft];

T - timpul de expunere [48]:

$$T = \frac{L_h L_{TJ}}{DP_{JL}} \text{ [ore]} \quad (5.2)$$

R este raza de curbură a traiectului sondei în fiecare punct unde se calculează forțele axiale [ft];

S - distanța de deplasare a racordului / unitatea de gaură forată [ft];

F_a - forța axială în garnitura de foraj la fiecare punct de calcul [lbs] – de exemplu la fiecare 100 ft sau 30 m;

$$F_n = \text{forța normală pe racord} = L_{TJ} \frac{F_a}{R} \text{ [lbs./ft]} \quad (5.3)$$

L - sarcina laterală pe prăjină :

$$L = (F_n L_{TJ}) DP_{JL} \text{ [lbs/ft]} \quad (5.4)$$

Factorul de uzură care controlează eficiența uzurii este definit [47, 48] ca raport între coeficientul de frecare F și energia specifică, și este determinat experimental, în laborator, pentru diferite condiții. Combinând ecuațiile de mai sus, se ajunge la o ecuație rearanjată care ne va conduce la determinarea volumului uzurii V [48]:

$$V = 60 \pi F L D_{TJ} \omega L_h / V_z \quad (5.5)$$

în care:

V este volumul uzurii pe unitatea de lungime [in³/ ft];

F - factorul de uzură psi⁻¹;

L - încărcarea laterală a prăjinii de foraj pe unitate de lungime [lbs/ft];

D_{TJ} - diametrul exterior racord special [in];

L_h - distanța forată [ft];

V_z - viteza de avansare [ft /hr.];

ω - rotații per minut.

Lungimea racordului special și lungimea prăjinii de foraj nu apar în ecuația 5.5, deoarece ele nu afectează în model linear cantitatea de metal pierdută prin uzură. Din nou, este subliniată importanța alegerii factorului de uzură. Sursele de alegere, în general, se găsesc tabelate în rapoartele de determinare efectuate în laboratoare de către diferitele firme de petrol și gaze, așa după cum sunt reproduse în tabelele 5.1 și 5.2 [46].

5.3. Modelarea calitativă a uzurii coloanei intermediare pentru o sondă dată – Operarea garniturii de foraj în flambaj factor generator de uzură pentru coloana intermediară

Pentru a face mai vizibilă influența intensității curburii traiectului găurii de sondă (*Dog Leg Severity-DLS*), precum și influența parametrilor regimului de foraj cum ar fi apăsarea pe sapă (WOB), viteza de avansare (ROP), viteza de rotație a garniturii de foraj (RPM), asupra valorilor de uzură a coloanei de burlane, a fost considerată

urmatoarea situație ipotetică. Sonda subiect: WP1A, având traiectoria, respectiv proiecțiile verticală și orizontală, variația DLS, așa după cum sunt redată în figurile 5.2, 5.3 și 5.4.

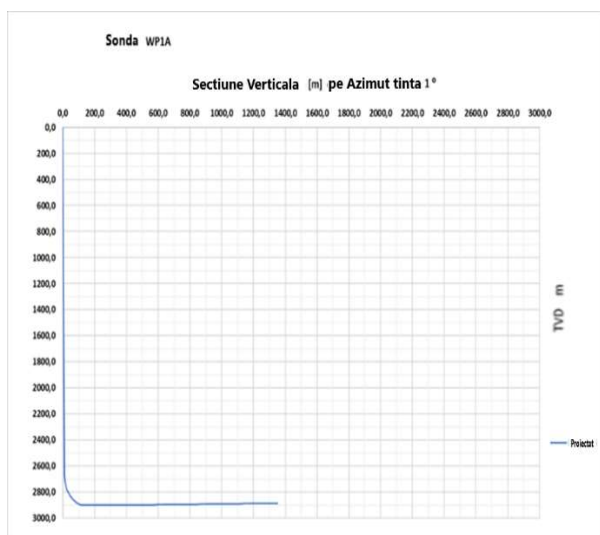


Fig. 5.2. Proiecția verticală sonda WP1A

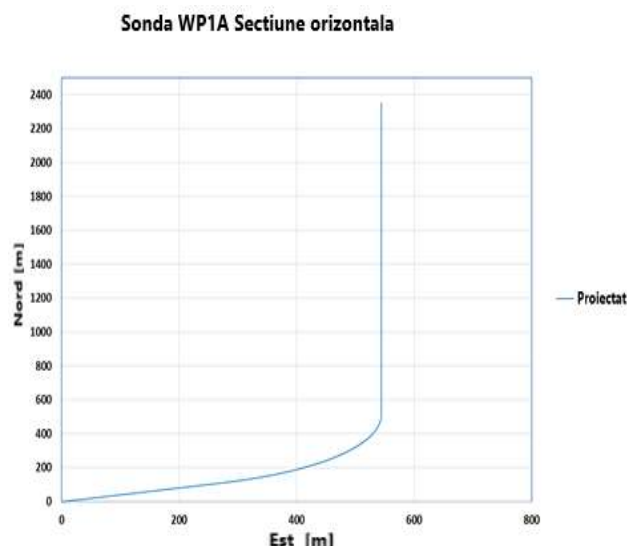


Fig. 5.3. Proiecția orizontală sonda WP1A

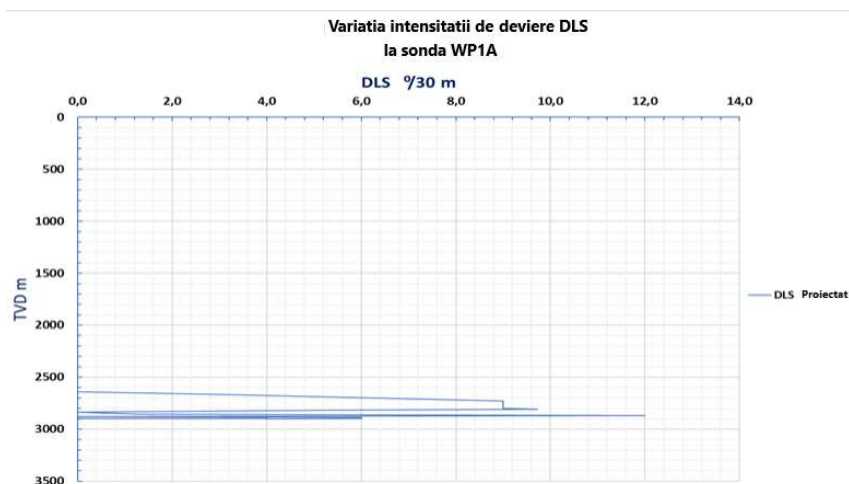


Fig. 5.4. Variația DLS sonda WP1A

Date de proiectare ale sondei și pentru simulare:

- Factorul de uzură $F=5,6 \text{ E-10 psi}^{-1}$ (fluid de foraj clar pe bază de apă, bentonită + lubricant 2% subiect de variație în studiul de senzitivitate);
- Racord prăjini de foraj de tip HT 40 Lungime = 0,6 m (1,96 ft) Oțel neted AISI 4145;
- Diametrul exterior al racordului prăjinii de 5,125" (130,1 mm);
- Coloana intermediară de 177,8 mm (7") P110 x 42,3 Kg/m (31,6 lbs/ft); sabot fixat la 3060 m (10099 ft) MD;
- Secțiunea orizontală (gaura de producție urmând sa fie forată) lungime= 2400 m (7895 ft);
- Viteza de avansare pentru forajul în rezervor ROP = 6m/ hr, (19,7 ft/ hr.) (subiect de variație în studiul de senzitivitate);
- Viteza de rotație a garniturii de foraj RPM RT/TDS RPM=60 la 100 (subiect de variație în studiul de senzitivitate);
- Apăsarea pe sapă WOB = 5000 daN (11240 lbs) la 10000 daN (22480 lbs) (subiect de variație în studiul de senzitivitate);
- Lateral / orizontal secțiunea de producție diametrul de foraj 155,7 mm (6,125");
- Densitate fluid foraj: 1,2 SG (9,96 ppg.);
- BHA și garnitura de foraj ca în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3. BHA și garnitura de foraj pentru sonda WP1A

DLS – <i>Dog Leg Severity</i> – Intensitatea devierii	[°/30 m]
F ₁ – Forța axială la baza primului element (sapa de foraj)	[daN]
F ₂ – Forța axială la partea superioară a primului element din garnitura de foraj	[daN]
L – Lungimea materialului tubular	[m]
N _R or RPM – Rotații / minut garnitură de foraj	
ROP – Viteza de avansare	[m/hr]
'r – Raza racordului special	[m]
V – Viteza axială a garniturii de foraj	[m/min]
V _h - Viteza de ridicare a garniturii de foraj la manevre	[m/min]
V _r – Viteza radială a garniturii de foraj	[m/sec]
V _p - Viteza de manevră	[m/sec]
'w – Greutatea lineară a unui element de garnitura de foraj	[daN/m]
W – Greutatea totală a garniturii de foraj în aer inclusive BHA	[daN]
'α- Unghiul de înclinare a găurii de sondă	[rad]
'β – Coeficientul de flotabilitate al materialului tubular	
'θ- Variația absolută a unghiului de azimut între doua stații de măsură	
'μ – Coeficient de frecare	
'ρ – Densitatea fluidului de foraj în gaura de sondă și în interior material tubular	[kgf/m ³]
Ψ – Unghiul dintre viteza axială și viteza tangențială	[rad]
φ – Unghiul de azimut la stația de măsurare	[rad]

Când încărcarea axială în compresiune este mai mare decât următoarele sarcini critice, materialul tubular va intra în flambaj sinusoidal (**Wu and Juvcam-Wold, 1993**) [47], după cum urmează:

$$F_{Cr} = 2(E I \beta w/r)^{1/2} \quad (5.8)$$

Pentru o gaură înclinată, ecuația (5.8) se scrie ca:

$$F_{Cr} = 2(E I \beta w \sin \alpha / r)^{1/2} \quad (5.9)$$

Într-o gaură de sondă verticală materialul tubular va flamba mai repede doar datorită efectului forțelor de frecare, conform ecuației: (Wu and Juvcam-Wold, 1993) [47]

$$F_{Cr} = 2,55 (E I (\beta w)^2)^{1/2} \quad (5.10)$$

Efectul flambajului sinusoidal datorat forțelor de frecare este normal și tolerabil pentru garnitura de foraj. Când sarcina de compresiune depășește următoarele forțe critice, atunci flambajul va trece în altă formă, respectiv, flambaj elicoidal. Flambajul elicoidal se dezvoltă de regulă în secțiunii de gaură orizontală și/sau înclinată (Aadony 2006) [47].

$$F_{EI} = (2 (2^{1/2}) - 1) \times F_{Cr} \quad (5.11)$$

Într-o secțiune de gaură verticală, Wu and Juckvam-Wold 1993 [47] au demonstrat, prin studiile lor, că forța critică la flambaj elicoidal este de două ori mai mare decât forța critică la flambaj sinusoidal:

$$F_{EI} = 2,18 F_{Cr} \quad (5.12)$$

în care:

F _{Cr} este forța critică la flambaj sinusoidal	[N]
F _{EI} - forța critică la flambaj elicoidal	[N]
w – greutatea unitară a materialului tubular	[N/m]
β – coeficientul de flotabilitate al materialului tubular	
α – unghiul de înclinare a găurii de sondă la stația de măsurare	[rad]
E – modulul de elasticitate	[N/m ²]
I - momentul de inerție al secțiunii materialului tubular	[m ⁴]
r – raza racordului special a prăjini de foraj	[m]

Introducându-se valorile pentru parametrii găurii de sondă a garniturii de foraj inclusiv BHA, parametrii regimului de foraj și, luându-se în considerare convenția că “+” se aplică la extragerea garniturii de foraj, corectare ascendentă, manevră ascendentă a garniturii de foraj, și “-” se aplică la introducerea garniturii de foraj, manevra descendentă, corectare și foraj propriu-zis, se pot calcula încărcările cu forțe în garnitura de foraj, deci se poate stabili regimul de flambaj, cu alte cuvinte se pot calcula forțele normale pe racordurile prăjinilor de foraj, așa încât prin utilizarea ecuației 5.1 rescrisă sub forma 5.5, este posibil să se estimeze procentul de uzură a coloanei de burlane pe unitatea de lungime. Atenție însă: nu trebuie să se confunde cu adâncimea șanțului provocat de uzură, geometria uzurii nefiind studiată în această lucrare!

Rezultatele utilizării ecuațiilor de frecare (figura 5.5 și tabelul 5.6, plus condițiile de flambaj) arată că sub parametri normali ai regimului de foraj, starea de flambaj a garniturii de foraj este sub starea critică de flambaj sinusoidal. Dacă pentru motive necunoscute și neașteptate apăsarea pe sapă (WOB) va crește spre 15000 daN (figura 5.6 și tabelul 5.8), atunci garnitura de foraj va flamba peste limita critică la flambaj sinusoidal și elicoidal (în jurul adâncimii de 2600 m MD), cu consecințe semnificative asupra uzurii coloanei tubate, așa după cum se va prezenta în cele ce urmează.

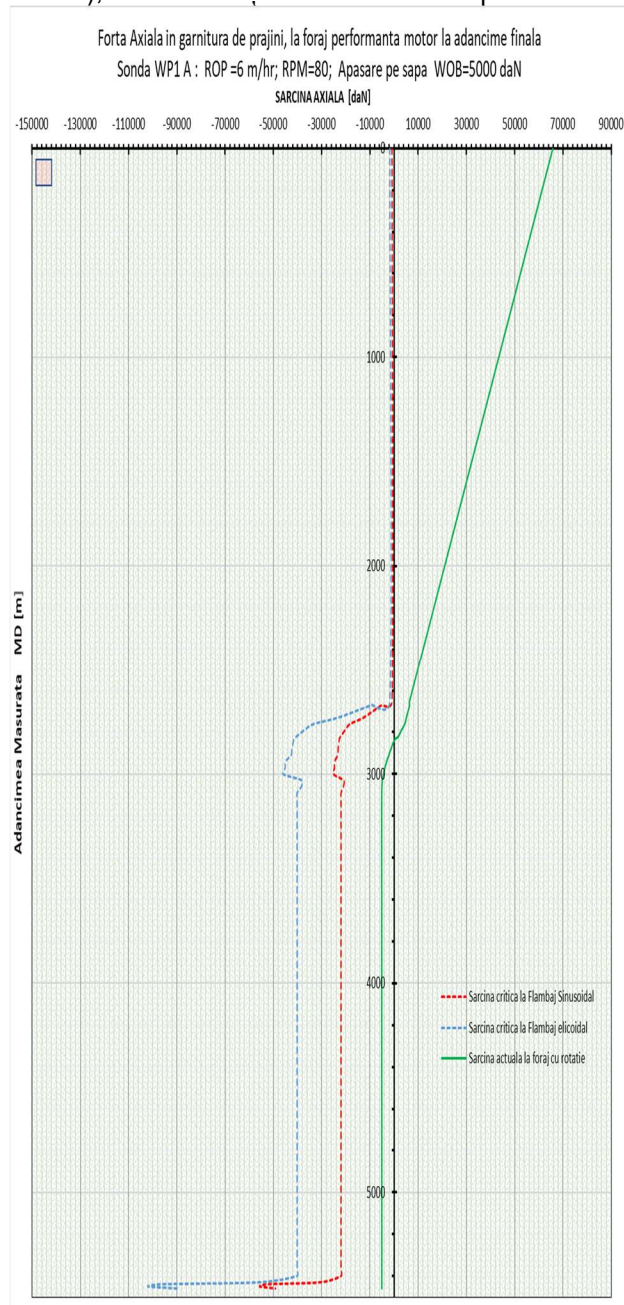


Fig. 5.5. Starea de flambaj în garnitura de foraj la sonda WP1A; apăsarea pe sapa WOB 5000 daN

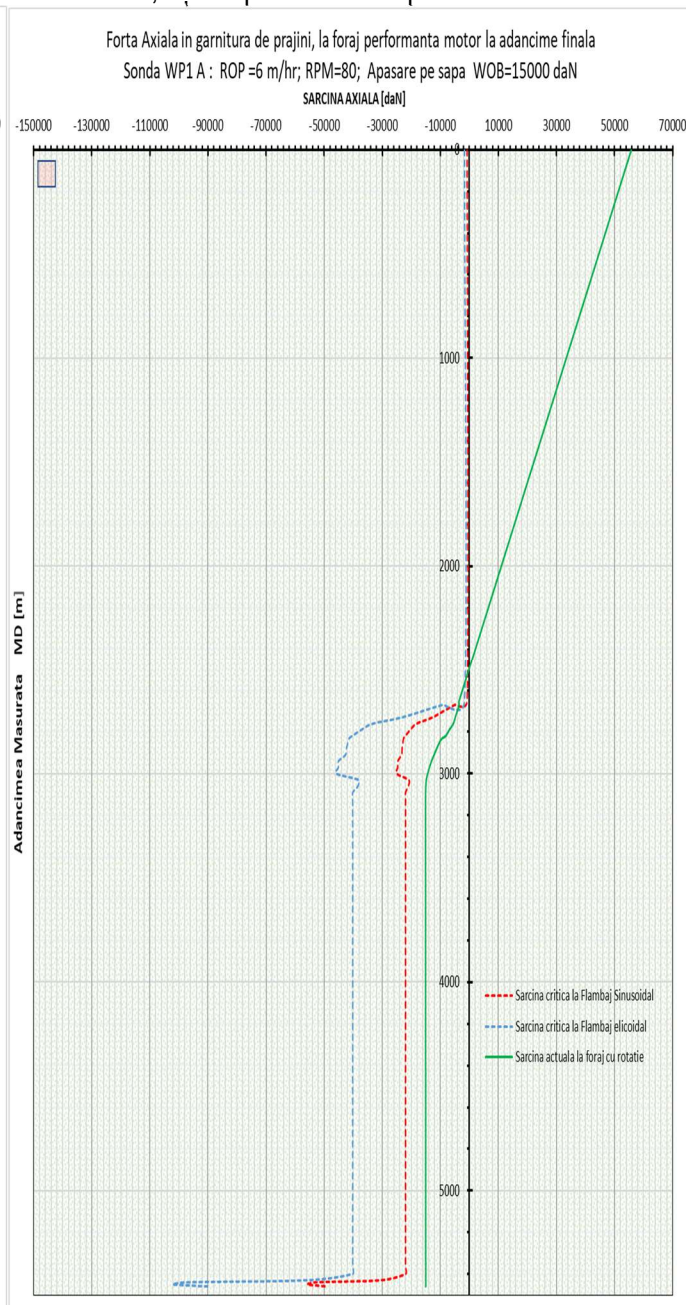


Fig. 5.6 Starea de flambaj în garnitura de foraj sonda WP1A; apăsarea pe sapa WOB 15000 daN

Uzura coloanei va fi modelată luându-se în considerare faptul că forțele normale au valoarea „0” de-a lungul intervalului vertical al găurii de sondă, iar secțiunea orizontală a sondei este gaura liberă care se forează. Predicția uzurii se va face deci pentru coloana intermediară de 7 in; P110; 42,3 kg/m, care este deja tubată și cimentată, cu accent pe intervalul de creștere a înclinării găurii de sondă de la 2670 m MD până la sabotul coloanei intermediare la 3060 m MD. Prin convenție, forțele de frecare ce acționează la ridicarea garniturii de foraj vor fi considerate pozitive iar în cazul coborârii garniturii de foraj, săpării, corectării, vor fi considerate negative.

Tabelul 5.6. Sarcinile în garnitura de foraj în sonda WP1A pentru 5000 daN apăsare pe sapă

PLANIFICAT				CALCULAT			GARNITURA DE FORAJ			Incarcarea axiale in garnitura de foraj		
#	MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	De la sapa la suprafata			Flambaj		
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	w/30 m	Spec	L m	Increment m	E X I [m4]	F _{cr Sin}	F _{cr Elic}
1	0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0,0	599770	-787	-1715
2	2650	0,0	0	2650,0	0,0	0,0	DP2	2630,0	5460,0	599770	-787	-1715
3	2670	3,25	67,9	2670,0	0,3	3,2	DP2	30,0	2830,0	599770	-5008	-9157
4	2730	21,25	67,9	2728,4	5,3	9,0	DP2	60,0	2800,0	599770	-12663	-23153
5	2760	30,25	67,9	2755,4	10,4	9,0	HWDP	30,0	2740,0	888681	-18172	-33226
6	2790	39,25	67,9	2780,0	17,1	9,0	HWDP	30,0	2710,0	888681	-20365	-37236
7	2820	48,25	67,9	2801,6	25,2	9,0	HWDP	30,0	2680,0	888681	-22114	-40344
8	2830	51,49	67,9	2808,1	28,2	9,7	HWDP	30,0	2650,0	888681	-22648	-41410
9	2850	53	67,9	2820,1	34,5	2,3	HWDP	30,0	2620,0	888681	-22880	-41835
10	2880	55	67,9	2837,3	44,1	2,0	HWDP	30,0	2590,0	888681	-23172	-42369
11	2910	56,23	67,9	2854,2	53,8	1,2	HWDP	30,0	2560,0	888681	-23343	-42681
12	2940	68	67,9	2868,2	64,2	11,8	HWDP	30,0	2530,0	888681	-24653	-45076
13	2970	68,23	67,9	2879,3	75,1	0,2	HWDP	30,0	2500,0	888681	-24673	-45112
14	3000	74,23	67,9	2888,9	86,3	6,0	HWDP	30,0	2470,0	888681	-25116	-45923
15	3030	80,23	67,9	2895,6	97,7	6,0	DP1	30,0	2440,0	599770	-20880	-38178
16	3060	86,23	67,9	2899,1	109,4	6,0	DP1	30,0	2410,0	599770	-21010	-38416
17	3090	90	66,42	2900,1	121,5	6,0	DP1	30,0	2380,0	599770	-21968	-40168
18	3120	90	62,42	2900,1	134,9	4,0	DP1	30,0	2350,0	599770	-21968	-40168
19	3150	90	58,42	2900,1	150,1	4,0	DP1	30,0	2320,0	599770	-21968	-40168
20	3180	90	54,42	2900,1	167,2	4,0	DP1	30,0	2290,0	599770	-21968	-40168
21	3210	90	50,42	2900,1	185,9	4,0	DP1	30,0	2260,0	599770	-21968	-40168
22	3240	90	46,42	2900,1	206,1	4,0	DP1	30,0	2230,0	599770	-21968	-40168
23	3270	90	42,42	2900,1	227,9	3,8	DP1	30,0	2200,0	599770	-21968	-40168
24	3300	90	38,42	2900,1	251,1	4,0	DP1	30,0	2170,0	599770	-21968	-40168
25	3330	90	34,42	2900,1	275,5	4,0	DP1	30,0	2140,0	599770	-21968	-40168
26	3360	90	30,42	2900,1	301,1	4,0	DP1	30,0	2110,0	599770	-21968	-40168
27	3390	90	26,42	2900,1	327,7	4,0	DP1	30,0	2080,0	599770	-21968	-40168
28	3420	90	22,42	2900,1	355,3	4,0	DP1	30,0	2050,0	599770	-21968	-40168
29	3450	90	18,42	2900,0	383,6	4,0	DP1	30,0	2020,0	599770	-21968	-40168
30	3480	90	14,42	2899,9	412,5	4,0	DP1	30,0	1990,0	599770	-21968	-40168
31	3510	90	10,42	2899,7	441,9	4,0	DP1	30,0	1960,0	599770	-21968	-40168
32	3540	90	6,43	2899,4	471,6	4,0	DP1	30,0	1930,0	599770	-21968	-40168
33	3570	90	2,43	2899,1	501,6	4,0	DP1	30,0	1900,0	599770	-21968	-40168
34	3600	90	0	2898,6	531,6	2,4	DP1	30,0	1870,0	599770	-21968	-40168
35	3630	90	0	2898,2	561,6	0,0	DP1	30,0	1840,0	599770	-21968	-40168
36	3660	90	0	2897,8	591,6	0,0	DP1	30,0	1810,0	599770	-21968	-40168
37	3690	90	0	2897,3	621,6	0,0	DP1	30,0	1780,0	599770	-21968	-40168
38	3720	90	0	2896,9	651,6	0,0	DP1	30,0	1750,0	599770	-21968	-40168
39	3750	90	0	2896,5	681,6	0,0	DP1	30,0	1720,0	599770	-21968	-40168
40	3780	90	0	2896,0	711,6	0,0	DP1	30,0	1690,0	599770	-21968	-40168
41	3810	90	0	2895,6	741,5	0,0	DP1	30,0	1660,0	599770	-21968	-40168
42	3840	90	0	2895,1	771,5	0,0	DP1	30,0	1630,0	599770	-21968	-40168
43	3870	90	0	2894,7	801,5	0,0	DP1	30,0	1600,0	599770	-21968	-40168
44	3900	90	0	2894,7	801,5	0,0	DP1	30,0	1570,0	599770	-21968	-40168
45	3930	90	0	2894,3	831,5	0,0	DP1	30,0	1540,0	599770	-21968	-40168
46	3960	90	0	2893,8	861,5	0,0	DP1	30,0	1510,0	599770	-21968	-40168
47	3990	90	0	2893,4	891,5	0,0	DP1	30,0	1480,0	599770	-21968	-40168
48	4020	90	0	2892,9	921,5	0,0	DP1	30,0	1450,0	599770	-21968	-40168
49	4050	90	0	2892,5	951,5	0,0	DP1	30,0	1420,0	599770	-21968	-40168
50	4080	90	0	2892,1	981,5	0,0	DP1	30,0	1390,0	599770	-21968	-40168
51	4110	90	0	2891,6	1011,5	0,0	DP1	30,0	1360,0	599770	-21968	-40168
52	4140	90	0	2891,2	1041,5	0,0	DP1	30,0	1330,0	599770	-21968	-40168
53	4170	90	0	2890,7	1071,5	0,0	DP1	30,0	1300,0	599770	-21968	-40168
54	4200	90	0	2890,3	1101,5	0,0	DP1	30,0	1270,0	599770	-21968	-40168
55	4230	90	0	2889,9	1131,5	0,0	DP1	30,0	1240,0	599770	-21968	-40168
56	4260	90	0	2889,4	1161,5	0,0	DP1	30,0	1210,0	599770	-21968	-40168
57	4290	90	0	2889,0	1191,5	0,0	DP1	30,0	1180,0	599770	-21968	-40168
58	4320	90	0	2888,5	1221,5	0,0	DP1	30,0	1150,0	599770	-21968	-40168
59	4350	90	0	2888,1	1251,5	0,0	DP1	30,0	1120,0	599770	-21968	-40168
60	4380	90	0	2887,7	1281,5	0,0	DP1	30,0	1090,0	599770	-21968	-40168
61	4410	90	0	2887,2	1311,5	0,0	DP1	30,0	1060,0	599770	-21968	-40168
62	4440	90	0	2886,8	1341,5	0,0	DP1	30,0	1030,0	599770	-21968	-40168
63	4470	90	0	2886,3	1371,4	0,0	DP1	30,0	1000,0	599770	-21968	-40168
64	4500	90	0	2885,9	1401,4	0,0	DP1	30,0	970,0	599770	-21968	-40168
65	4530	90	0	2885,5	1431,4	0,0	DP1	30,0	940,0	599770	-21968	-40168
66	4560	90	0	2885,0	1461,4	0,0	DP1	30,0	910,0	599770	-21968	-40168
67	4590	90	0	2884,6	1491,4	0,0	DP1	30,0	880,0	599770	-21968	-40168
68	4620	90	0	2884,1	1521,4	0,0	DP1	30,0	850,0	599770	-21968	-40168
69	4650	90	0	2883,7	1551,4	0,0	DP1	30,0	820,0	599770	-21968	-40168
70	4680	90	0	2883,3	1581,4	0,0	DP1	30,0	790,0	599770	-21968	-40168
71	4710	90	0	2882,8	1611,4	0,0	DP1	30,0	760,0	599770	-21968	-40168
72	4740	90	0	2882,4	1641,4	0,0	DP1	30,0	730,0	599770	-21968	-40168
73	4770	90	0	2881,9	1671,4	0,0	DP1	30,0	700,0	599770	-21968	-40168
74	4800	90	0	2881,5	1701,4	0,0	DP1	30,0	670,0	599770	-21968	-40168
75	4830	90	0	2881,1	1731,4	0,0	DP1	30,0	640,0	599770	-21968	-40168
76	4860	90	0	2880,6	1761,4	0,0	DP1	30,0	610,0	599770	-21968	-40168
77	4890	90	0	2880,2	1847,1	0,0	DP1	30,0	580,0	599770	-21968	-40168
78	4920	90	0	2879,7	1821,3	0,0	DP1	30,0	550,0	599770	-21968	-40168
79	4950	90	0	2879,3	1851,3	0,0	DP1	30,0	520,0	599770	-21968	-40168
80	4980	90	0	2878,9	1881,3	0,0	DP1	30,0	490,0	599770	-21968	-40168
81	5010	90	0	2878,4	1911,3	0,0	DP1	30,0	460,0	599770	-21968	-40168
82	5040	90	0	2878,0	1941,3	0,0	DP1	30,0	430,0	599770	-21968	-40168
83	5070	90	0	2877,5	1971,3	0,0	DP1	30,0	400,0	599770	-21968	-40168
84	5100	90	0	2877,1	2001,3	0,0	DP1	30,0	370,0	599770	-21968	-40168
85	5130	90	0	2876,7	2031,3	0,0	DP1	30,0	340,0	599770	-21968	-40168
86	5160	90	0	2876,2	2061,3	0,0	DP1	30,0	310,0	599770	-21968	-40168
87	5190</											

PLANIFICAT				CALCULAT			GARNITURA DE FORAJ			Incarcarea axiala in garnitura de foraj		
#	MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	De la sapa la suprafata			Flambaj		
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	o/30 m	Spec	Lm	Increment m	E x I [m4]	F _{cr} Sin	F _{cr} Elic
1	0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0,0	599770	-787	-1715
2	2650	0,0	0	2650,0	0,0	0,0	DP2	2630,0	5460,0	599770	-787	-1715
3	2670	3,25	67,9	2670,0	0,3	3,2	DP2	30,0	2830,0	599770	-5008	-9157
4	2730	21,25	67,9	2728,4	5,3	9,0	DP2	60,0	2800,0	599770	-12663	-23153
5	2760	30,25	67,9	2755,4	10,4	9,0	HWDP	30,0	2740,0	888681	-18172	-33226
6	2790	39,25	67,9	2780,0	17,1	9,0	HWDP	30,0	2710,0	888681	-20365	-37236
7	2820	48,25	67,9	2801,6	25,2	9,0	HWDP	30,0	2680,0	888681	-22114	-40434
8	2830	51,49	67,9	2808,1	28,2	9,7	HWDP	30,0	2650,0	888681	-22648	-41410
9	2850	53	67,9	2820,1	34,5	2,3	HWDP	30,0	2620,0	888681	-22880	-41835
10	2880	55	67,9	2837,3	44,1	2,0	HWDP	30,0	2590,0	888681	-23172	-42369
11	2910	56,23	67,9	2854,2	53,8	1,2	HWDP	30,0	2560,0	888681	-23343	-42681
12	2940	68	67,9	2868,2	64,2	11,8	HWDP	30,0	2530,0	888681	-24653	-45076
13	2970	68,23	67,9	2879,3	75,1	0,2	HWDP	30,0	2500,0	888681	-24673	-45112
14	3000	74,23	67,9	2888,9	86,3	6,0	HWDP	30,0	2470,0	888681	-25116	-45923
15	3030	80,23	67,9	2895,6	97,7	6,0	DP1	30,0	2440,0	599770	-20880	-38178
16	3060	86,23	67,9	2899,1	109,4	6,0	DP1	30,0	2410,0	599770	-21010	-38416
17	3090	90	66,42	2900,1	121,5	6,0	DP1	30,0	2380,0	599770	-21968	-40168
18	3120	90	62,42	2900,1	134,9	4,0	DP1	30,0	2350,0	599770	-21968	-40168
19	3150	90	58,42	2900,1	150,1	4,0	DP1	30,0	2320,0	599770	-21968	-40168
20	3180	90	54,42	2900,1	167,2	4,0	DP1	30,0	2290,0	599770	-21968	-40168
21	3210	90	50,42	2900,1	185,9	4,0	DP1	30,0	2260,0	599770	-21968	-40168
22	3240	90	46,42	2900,1	206,1	4,0	DP1	30,0	2230,0	599770	-21968	-40168
23	3270	90	42,42	2900,1	227,9	3,8	DP1	30,0	2200,0	599770	-21968	-40168
24	3300	90	38,42	2900,1	251,1	4,0	DP1	30,0	2170,0	599770	-21968	-40168
25	3330	90	34,42	2900,1	275,5	4,0	DP1	30,0	2140,0	599770	-21968	-40168
26	3360	90	30,42	2900,1	301,1	4,0	DP1	30,0	2110,0	599770	-21968	-40168
27	3390	90	26,42	2900,1	327,7	4,0	DP1	30,0	2080,0	599770	-21968	-40168
28	3420	90	22,42	2900,1	355,3	4,0	DP1	30,0	2050,0	599770	-21968	-40168
29	3450	90	18,42	2900,0	383,6	4,0	DP1	30,0	2020,0	599770	-21968	-40168
30	3480	90	14,42	2899,9	412,5	4,0	DP1	30,0	1990,0	599770	-21968	-40168
31	3510	90	10,42	2899,7	441,9	4,0	DP1	30,0	1960,0	599770	-21968	-40168
32	3540	90	6,43	2899,4	471,6	4,0	DP1	30,0	1930,0	599770	-21968	-40168
33	3570	90	2,43	2899,1	501,6	4,0	DP1	30,0	1900,0	599770	-21968	-40168
34	3600	90	0	2898,6	531,6	2,4	DP1	30,0	1870,0	599770	-21968	-40168
35	3630	90	0	2898,2	561,6	0,0	DP1	30,0	1840,0	599770	-21968	-40168
36	3660	90	0	2897,8	591,6	0,0	DP1	30,0	1810,0	599770	-21968	-40168
37	3690	90	0	2897,3	621,6	0,0	DP1	30,0	1780,0	599770	-21968	-40168
38	3720	90	0	2896,9	651,6	0,0	DP1	30,0	1750,0	599770	-21968	-40168
39	3750	90	0	2896,5	681,6	0,0	DP1	30,0	1720,0	599770	-21968	-40168
40	3780	90	0	2896,0	711,6	0,0	DP1	30,0	1690,0	599770	-21968	-40168
41	3810	90	0	2895,6	741,5	0,0	DP1	30,0	1660,0	599770	-21968	-40168
42	3840	90	0	2895,1	771,5	0,0	DP1	30,0	1630,0	599770	-21968	-40168
43	3870	90	0	2894,7	801,5	0,0	DP1	30,0	1600,0	599770	-21968	-40168
44	3900	90	0	2894,7	801,5	0,0	DP1	30,0	1570,0	599770	-21968	-40168
45	3930	90	0	2894,3	831,5	0,0	DP1	30,0	1540,0	599770	-21968	-40168
46	3960	90	0	2893,8	861,5	0,0	DP1	30,0	1510,0	599770	-21968	-40168
47	3990	90	0	2893,4	891,5	0,0	DP1	30,0	1480,0	599770	-21968	-40168
48	4020	90	0	2892,9	921,5	0,0	DP1	30,0	1450,0	599770	-21968	-40168
49	4050	90	0	2892,5	951,5	0,0	DP1	30,0	1420,0	599770	-21968	-40168
50	4080	90	0	2892,1	981,5	0,0	DP1	30,0	1390,0	599770	-21968	-40168
51	4110	90	0	2891,6	1011,5	0,0	DP1	30,0	1360,0	599770	-21968	-40168
52	4140	90	0	2891,2	1041,5	0,0	DP1	30,0	1330,0	599770	-21968	-40168
53	4170	90	0	2890,7	1071,5	0,0	DP1	30,0	1300,0	599770	-21968	-40168
54	4200	90	0	2890,3	1101,5	0,0	DP1	30,0	1270,0	599770	-21968	-40168
55	4230	90	0	2889,9	1131,5	0,0	DP1	30,0	1240,0	599770	-21968	-40168
56	4260	90	0	2889,4	1161,5	0,0	DP1	30,0	1210,0	599770	-21968	-40168
57	4290	90	0	2889,0	1191,5	0,0	DP1	30,0	1180,0	599770	-21968	-40168
58	4320	90	0	2888,5	1221,5	0,0	DP1	30,0	1150,0	599770	-21968	-40168
59	4350	90	0	2888,1	1251,5	0,0	DP1	30,0	1120,0	599770	-21968	-40168
60	4380	90	0	2887,7	1281,5	0,0	DP1	30,0	1090,0	599770	-21968	-40168
61	4410	90	0	2887,2	1311,5	0,0	DP1	30,0	1060,0	599770	-21968	-40168
62	4440	90	0	2886,8	1341,5	0,0	DP1	30,0	1030,0	599770	-21968	-40168
63	4470	90	0	2886,3	1371,4	0,0	DP1	30,0	1000,0	599770	-21968	-40168
64	4500	90	0	2885,9	1401,4	0,0	DP1	30,0	970,0	599770	-21968	-40168
65	4530	90	0	2885,5	1431,4	0,0	DP1	30,0	940,0	599770	-21968	-40168
66	4560	90	0	2885,0	1461,4	0,0	DP1	30,0	910,0	599770	-21968	-40168
67	4590	90	0	2884,6	1491,4	0,0	DP1	30,0	880,0	599770	-21968	-40168
68	4620	90	0	2884,1	1521,4	0,0	DP1	30,0	850,0	599770	-21968	-40168
69	4650	90	0	2883,7	1551,4	0,0	DP1	30,0	820,0	599770	-21968	-40168
70	4680	90	0	2883,3	1581,4	0,0	DP1	30,0	790,0	599770	-21968	-40168
71	4710	90	0	2882,8	1611,4	0,0	DP1	30,0	760,0	599770	-21968	-40168
72	4740	90	0	2882,4	1641,4	0,0	DP1	30,0	730,0	599770	-21968	-40168
73	4770	90	0	2881,9	1671,4	0,0	DP1	30,0	700,0	599770	-21968	-40168
74	4800	90	0	2881,5	1701,4	0,0	DP1	30,0	670,0	599770	-21968	-40168
75	4830	90	0	2881,1	1731,4	0,0	DP1	30,0	640,0	599770	-21968	-40168
76	4860	90	0	2880,6	1761,4	0,0	DP1	30,0	610,0	599770	-21968	-40168
77	4890	90	0	2880,2	1847,1	0,0	DP1	30,0	580,0	599770	-21968	-40168
78	4920	90	0	2879,7	1821,3	0,0	DP1	30,0	550,0	599770	-21968	-40168
79	4950	90	0	2879,3	1851,3	0,0	DP1	30,0	520,0	599770	-21968	-40168
80	4980	90	0	2878,9	1881,3	0,0	DP1	30,0	490,0	599770	-21968	-40168
81	5010	90	0	2878,4	1911,3	0,0	DP1	30,0	460,0	599770	-21968	-40168
82	5040	90	0	2878,0	1941,3	0,0	DP1	30,0	430,0	599770	-21968	-40168
83	5070	90	0	2877,5	1971,3	0,0	DP1	30,0	400,0	599770	-21968	-40168
84	5100	90	0	2877,1	2001,3	0,0	DP1	30,0	370,0	599770	-21968	-40168
85	5130	90	0	2876,7	2031,3	0,0	DP1	30,0	340,0	599770	-21968	-40168
86	5160	90	0	2876,2	2061,3	0,0	DP1	30,0	310,0	599770	-21968	-40168
87	5190	90	0	2875,8	2091,3	0,0	DP1	30,0	280,0	599770	-21968	-40168
88	5220	90	0	2875,4	2121,3	0,0	DP1	30,0	250,0	599770	-21968	-40168
89	5250	90	0	2874,9	2151,3	0,0	DP1	30,0	220,0	599770	-21968	-40168
90	5280	90	0	2874,5	2181,3	0,0	DP1	30,0	190,0	599770	-21968	-40168
91	5310	90	0	2874,0	2211,3	0,0	DP1	30,0	160,0	599770	-21968	-40168
92	5340	90	0	2873,6	2241,3	0,0	DP1	30,0	130,0	599770	-21968	-40168
93	5370	90	0	2873,2	2271,2	0,0	DP1	30,0	100,0	599770	-21968	-40168
94	5400	90	0	2873,6	2241,3	0,0	DP1	30,0	70,0	599770	-21968	-40168
95	5430	90	0	2873,2	2271,2	0,0	BHA OD4	20,0	40,0	2116045	-30356	-55503
96	5440	90	0	2872,7	2301,2	0,0	BHA OD3	10,0	20,0	2028725	-52919	-96758
97	5450	90	0	2872,3	2331,2	0,0	BHA OD2	10,0	10,0	2116045	-55829	-102079
98	5460											

Având forțele normale calculate și, apoi, utilizându-se ecuația aferentă uzurii coloanei, în procente, aceasta poate fi calculată pentru RPM = 80; apăsarea pe sapă WOB = 5000 daN; avansare ROP = 6 m/oră (tabelul 5.8). În figura 5.7 este prezentată predicția uzurii coloanei intermediare de 7 in, diametrul exterior, la sonda WP1A.

Tabelul 5.8. Calculul uzurii la coloanei intermediare De= 7 in la sonda WP1A pentru 80 RPM

PLANIFICAT				CALCULAT			Scenariul de Operare B				Modelarea uzurii pentru coloana intermediara 7" P110 42,3 Kg/m						
#	MD	Inclin.	Azmut	TVD	V Sec	DLS	Foraj Rotativ performanta motor										
							Parametri	Forta axiale Fi daN	Σ Fi daN	R Raza de curbura [m]	F _n / Racord [lbs/ft]	F _n /Prajina [lbs/ft]	Volum uzura [in ³ /ft]	Volum uzura V [cm ³ /m] x 7,8 [g/cm ³] / [m]	% Uzura coloana interm. 7"	Observatii	
0	m	grd.	grd.	Z (m)	m	a/30 m	RPM=	0	65837	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	Wear 0 Vertical	
2	2650	0,0	0	2650,0	0,0	0,0	80	0	6513	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00%	Wear 0 Vertical	
3	2670	3,25	67,9	2670,0	0,3	3,2	ROP [m/Hr.] =	1352,8	6513	529	18,31	15,69	0,35	145,72	0,34%	Wear +	Partea inalta
4	2730	21,25	67,9	2728,4	5,3	9,0	6,00	658,9	5160	191	40,17	34,43	0,76	319,73	0,76%	Wear +	Partea inalta
5	2760	30,25	67,9	2755,4	10,4	9,0	Va [m/s]=	1396,5	4501	191	35,04	30,03	0,67	278,91	0,66%	Wear +	Partea inalta
6	2790	39,25	67,9	2780,0	17,1	9,0	0,00167	1273,9	3105	191	24,17	20,72	0,46	192,38	0,45%	Wear +	Partea inalta
7	2820	48,25	67,9	2801,6	25,2	9,0	Vr [m/s]=	1119,9	1831	191	14,25	12,22	0,27	113,44	0,27%	Wear +	Partea inalta
8	2830	51,49	67,9	2808,1	28,2	9,7	0,56	1000,1	711	177	5,98	5,12	0,11	47,58	0,11%	Wear +	Partea inalta
9	2850	53	67,9	2820,1	34,5	2,3	ψ=	950,1	-289	758	-0,57	-0,49	-0,01	-4,52	-0,01%	Wear -	Partea joasa
10	2880	55	67,9	2837,3	44,1	2,0	0,00	912,1	-1239	860	-2,14	-1,84	-0,04	-17,06	-0,04%	Wear -	Partea joasa
11	2910	56,23	67,9	2854,2	53,8	1,2	SIN(ψ) =	876,4	-2151	1398	-2,29	-1,96	-0,04	-18,22	-0,04%	Wear -	Partea joasa
12	2940	68	67,9	2868,2	64,2	11,8	0,00	724,2	-3028	146	-30,82	-26,42	-0,59	-245,33	-0,58%	Wear -	Partea joasa
13	2970	68,23	67,9	2879,3	75,1	0,2	WOB [daN]	578,4	-3752	7477	-0,75	-0,64	-0,01	-5,94	-0,01%	Wear -	Partea joasa
14	3000	74,23	67,9	2888,9	86,3	6,0	-5000,00	498,9	-4330	287	-22,47	-19,26	-0,43	-178,87	-0,42%	Wear -	Partea joasa
15	3030	80,23	67,9	2895,6	97,7	6,0		149,3	-4829	287	-25,06	-21,48	-0,48	-199,48	-0,47%	Wear -	Partea joasa
Sabot	3060	86,23	67,9	2899,1	109,4	6,0	Sabot coloana	-1	-4978	287	-25,84	-22,14	-0,49	-205,64	-0,49%	Wear -	Partea joasa

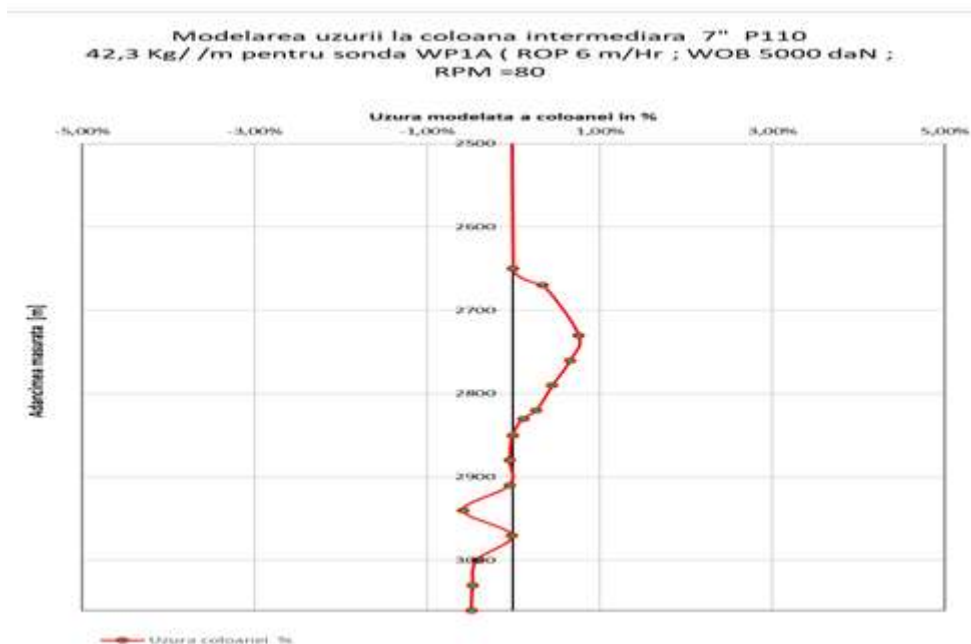


Fig. 5.7. Predicția uzurii coloanei intermediare De= 7" la sonda WP1A

Prin convenție, “uzura negativă” înseamnă partea de jos a suprafeței interioare a coloanei intermediare, iar “uzură pozitivă” înseamnă uzura la partea superioară a suprafeței interioare a coloanei intermediare. Pentru a sublinia efectul rotirii asupra uzurii suprafeței interioare a coloanei intermediare, vor fi menținuți constanți parametrii apăsare pe sapa (WOB), viteza de avansare (ROP) și coeficientul uzurii F, variind doar viteza de rotație a garniturii de foraj (RPM) pentru 100;120;140 rotații pe minut. Valorile uzurii coloanei intermediare în aceste ipoteze sunt redată în tabelul 5.9 și în figura 5.8. Așa după cum se poate vedea, uzura coloanei crește odată cu creșterea vitezei de rotație a garniturii de foraj.

Tabelul 5.9. Uzura coloanei intermediare De=7 in, în %, pentru RPM variabil sonda WP1A

PLANIFICAT			CALCULAT			% Uzura coloana (pentru 7" P110 42,3 Kg/m)			
MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	Apasare= 5000 daN; Penetrare=6 m/Hr; Factor uzura F=5,6 E-10 psi-1			
m	grd.	grd.	Z (m)	m	o/30 m	la 80 rpm	la 100 rpm	la 120 rpm	la 140 rpm
0	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2650	1E-04	0	2650	0,0009028	1E-06	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2670	3,25	67,9	2670	0,3342508	3,25	0,34%	0,43%	0,52%	0,61%
2730	21,25	67,9	2728,4	5,302604	9	0,76%	0,95%	1,14%	1,33%
2760	30,25	67,9	2755,4	10,404818	9	0,66%	0,83%	0,99%	1,16%
2790	39,25	67,9	2780	17,098977	9	0,45%	0,57%	0,69%	0,80%
2820	48,25	67,9	2801,6	25,220249	9	0,27%	0,34%	0,41%	0,48%
2830	51,49	67,9	2808,1	28,216073	9,72	0,11%	0,14%	0,17%	0,20%
2850	53	67,9	2820,1	34,494529	2,27	-0,01%	-0,01%	-0,01%	-0,02%
2880	55	67,9	2837,3	44,124716	2	-0,04%	-0,05%	-0,06%	-0,07%
2910	56,23	67,9	2854,2	53,82654	1,23	-0,04%	-0,05%	-0,06%	-0,07%
2940	68	67,9	2868,2	64,209797	11,77	-0,58%	-0,72%	-0,86%	-1,01%
2970	68,23	67,9	2879,3	75,127628	0,23	-0,01%	-0,02%	-0,02%	-0,02%
3000	74,23	67,9	2888,9	86,253606	6	-0,42%	-0,53%	-0,63%	-0,74%
3030	80,23	67,9	2895,6	97,713867	6	-0,47%	-0,59%	-0,70%	-0,82%
3060	86,23	67,9	2899,1	109,38285	6	-0,49%	-0,61%	-0,73%	-0,85%

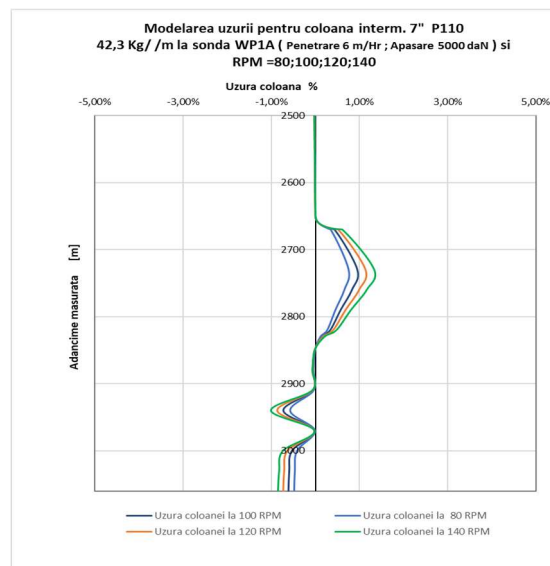


Fig. 5.8. Tendința uzurii coloanei în funcție de RPM

Dacă apăsarea pe sapă (WOB) și factorul uzurii sunt menținuți constanți, dar viteza de avansare descrește, atunci uzura coloanei crește. Rezultatele valorilor uzurii în aceste condiții sînt reprezentate în tabelul 5.10, iar trendul uzurii coloanei în figura 5.9.

Tabelul 5.10. Uzura coloanei intermediare De=7" în procente, pentru diferite valori ale vitezei de penetrare ROP la sonda WP1A

PLANIFICAT			CALCULAT			Uzura coloanei interm. in % pentru 7" P110 42,3 Kg/m			
MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	RPM= 80; Apasare=5000 daN Factor uzura F=5,6 E-10 psi-1			
m	grd.	grd.	Z (m)	m	o/30 m	ROP =2 m/Hr	ROP =3 m/Hr	ROP =6 m/Hr	ROP =9 m/Hr
0	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2650	1E-04	0	2650	0,0009028	1E-06	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2670	3,25	67,9	2670	0,3342508	3,25	1,04%	0,69%	0,34%	0,23%
2730	21,25	67,9	2728,4	5,302604	9	2,28%	1,52%	0,76%	0,50%
2760	30,25	67,9	2755,4	10,404818	9	2,00%	1,33%	0,66%	0,44%
2790	39,25	67,9	2780	17,098977	9	1,38%	0,92%	0,45%	0,30%
2820	48,25	67,9	2801,6	25,220249	9	0,82%	0,55%	0,27%	0,18%
2830	51,49	67,9	2808,1	28,216073	9,72	0,36%	0,23%	0,11%	0,07%
2850	53	67,9	2820,1	34,494529	2,27	-0,03%	-0,02%	-0,01%	-0,01%
2880	55	67,9	2837,3	44,124716	2	-0,12%	-0,08%	-0,04%	-0,03%
2910	56,23	67,9	2854,2	53,82654	1,23	-0,13%	-0,08%	-0,04%	-0,03%
2940	68	67,9	2868,2	64,209797	11,77	-1,72%	-1,15%	-0,58%	-0,39%
2970	68,23	67,9	2879,3	75,127628	0,23	-0,04%	-0,03%	-0,01%	-0,01%
3000	74,23	67,9	2888,9	86,253606	6	-1,26%	-0,84%	-0,42%	-0,28%
3030	80,23	67,9	2895,6	97,713867	6	-1,40%	-0,94%	-0,47%	-0,32%
3060	86,23	67,9	2899,1	109,38285	6	-1,45%	-0,97%	-0,49%	-0,33%

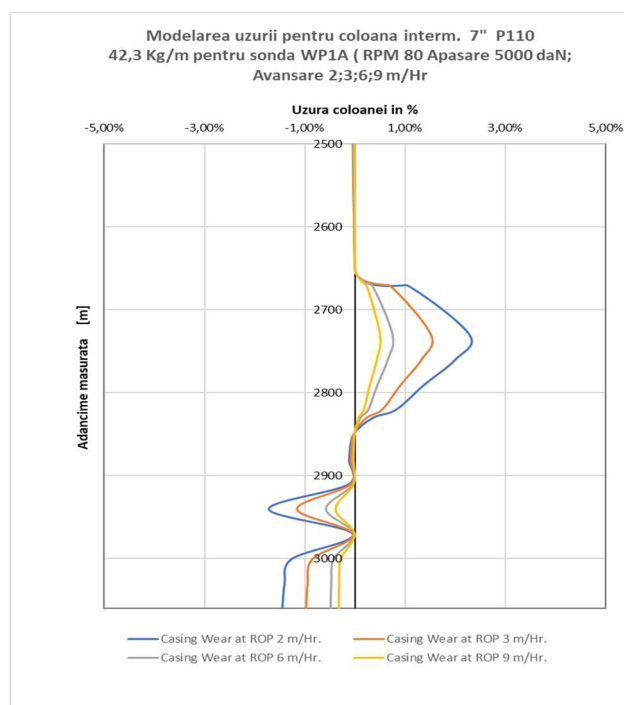


Fig. 5.9. Trendul uzurii coloanei cu descreșterea vitezei de penetrare ROP

Dacă viteza de penetrare (ROP), viteza de rotație a garniturii de foraj (RPM) și factorul uzurii (F) sunt menținuți constanți, iar apăsarea pe sapă (WOB) crește, atunci și uzura coloanei crește. Rezultatele sunt reprezentate în tabelul 5.11, iar tendința uzurii coloanei, în aceste ipoteze, este reprezentată în figura 5.10.

Tabelul 5.11. Uzura coloanei intermediare $D_e = 7$ in, sonda WP1A când apăsarea pe sapă crește

PLANIFICAT			CALCULAT			Uzura coloanei intern in % pentru 7" P110 42,3 Kg/m			
MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	<i>RPM= 80; Penetrare=5 m/Hr; Factor uzura F=5,6E-10 psi-1</i>			
m	grd.	grd.	Z (m)	m	α/30 m	Apasare 5000 daN	Apasare 7500 daN	Apasare 10000 daN	Apasare 12500 daN
0	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2650	1E-04	0	2650	0,0009028	1E-06	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2670	3,25	67,9	2670	0,3342508	3,25	0,34%	0,21%	0,08%	-0,05%
2730	21,25	67,9	2728,4	5,302604	9	0,76%	0,39%	0,02%	-0,34%
2760	30,25	67,9	2755,4	10,404818	9	0,66%	0,29%	-0,07%	-0,44%
2790	39,25	67,9	2780	17,098977	9	0,45%	0,09%	-0,28%	-0,64%
2820	48,25	67,9	2801,6	25,220249	9	0,27%	-0,10%	-0,46%	-0,83%
2830	51,49	67,9	2808,1	28,216073	9,72	0,11%	-0,28%	-0,68%	-1,07%
2850	53	67,9	2820,1	34,494529	2,27	-0,01%	-0,10%	-0,20%	-0,29%
2880	55	67,9	2837,3	44,124716	2	-0,04%	-0,12%	-0,20%	-0,28%
2910	56,23	67,9	2854,2	53,82654	1,23	-0,04%	-0,09%	-0,14%	-0,19%
2940	68	67,9	2868,2	64,209797	11,77	-0,58%	-1,06%	-1,54%	-2,02%
2970	68,23	67,9	2879,3	75,127628	0,23	-0,01%	-0,02%	-0,03%	-0,04%
3000	74,23	67,9	2888,9	86,253606	6	-0,42%	-0,67%	-0,91%	-1,16%
3030	80,23	67,9	2895,6	97,713867	6	-0,47%	-0,72%	-0,96%	-1,20%
3060	86,23	67,9	2899,1	109,38285	6	-0,49%	-0,73%	-0,97%	-1,22%

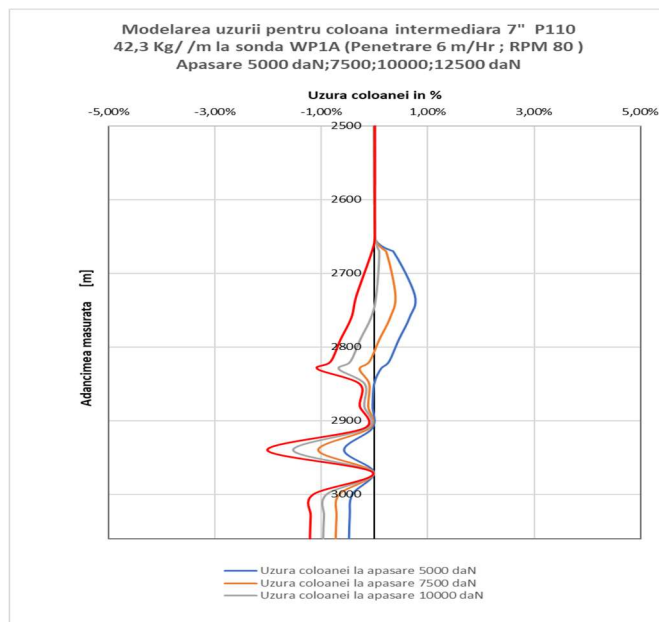


Fig. 5.10. Tendința uzurii coloanei când WOB crește

După cum apăsarea pe sapă (WOB) crește, zona de uzură a suprafeței interioare a coloanei intermediare se deplasează către partea inferioară a suprafeței coloanei intermediare, ca urmare a flambajului din garnitura de foraj. În aceste condiții, uzura coloanei poate atinge valori importante, deci nu este recomandat de a forța cu garnitura de foraj aflată la valori importante ale flambajului.

Un alt factor important în modelarea uzurii coloanelor de burlan o reprezintă calitatea fluidului de foraj din gaura de sondă, respectiv conținutul în solide. Pentru ipotezele de mai sus, factorul uzurii F a fost considerat / ales la valoarea de $5,6 \times 10^{-10} \text{ psi}^{-1}$, respectiv pentru un fluid de foraj pe bază de apă, bentonită, lubricant 2% și racorduri din oțel neted. Dacă pentru aceleași condiții și racorduri se consideră un fluid de foraj încărcat cu solide, factorul uzurii se reconsideră la valoarea de $8,25 \times 10^{-10} \text{ psi}^{-1}$.

Aplicându-se ecuația 5.5 pentru o apăsare pe sapă WOB = 6500 daN; o rotație RPM= 100, și o viteză de penetrare ROP=5 m/hr, uzura modelată în procente la coloana de exploatare de 7" la sonda WP1A va avea valorile conform tabelului 5.14.

Calitatea fluidului de foraj, incluzând conținutul în solide și conținutul de barită, este un subiect deosebit de sensibil deoarece poate induce valori ridicate ale factorului uzurii, aceasta fiind, în fapt, o problemă zilnică pentru operațiunile de foraj. În calculele rulate anterior s-a folosit un factor de uzura de $5,6 \times 10^{-10} \text{ psi}^{-1}$ corespunzător pentru un fluid de foraj pe bază de apă, 2% lubricant și racorduri de oțel neted [48]. Dacă fluidul de foraj are un conținut mai mare de solide, factorul uzurii trebuie ales la o valoare de $8,25 \times 10^{-10} \text{ psi}^{-1}$ [48], în practică putând fi chiar mai mare.

Valori modelate ale uzurii coloanei intermediare, pentru diferite valori ale factorului uzurii în condiția parametrilor regimului de foraj constanți, sunt reprezentate în tabelul 5.12 și figura 5.11.

Tabelul 5.12. Variația uzurii coloanei în procente, în funcție de creșterea valorilor factorului de uzură

PLANIFICAT			CALCULAT			Uzura coloanei % pentru 7" P110 42,3 Kg/m			
MD	Inclin.	Azimut	TVD	V Sec	DLS	<i>RPM= 100; Apasare=6500 daN; Avansare 5 m/Hr.</i>			
m	grd.	grd.	Z (m)	m	α/30 m	F. uzura=5 E10-1	F. uzura=10 E10-1	F. uzura=15 E10-1	F. uzura=20 E10-1
0	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2650	1E-04	0	2650	0,0009028	1E-06	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2670	3,25	67,9	2670	0,3342508	3,25	0,36%	0,71%	1,07%	1,43%
2730	21,25	67,9	2728,4	5,302604	9	0,72%	1,44%	2,17%	2,89%
2760	30,25	67,9	2755,4	10,404818	9	0,59%	1,19%	1,78%	2,37%
2790	39,25	67,9	2780	17,098977	9	0,32%	0,64%	0,96%	1,27%
2820	48,25	67,9	2801,6	25,220249	9	0,07%	0,14%	0,21%	0,27%
2830	51,49	67,9	2808,1	28,216073	9,72	-0,16%	-0,33%	-0,49%	-0,65%
2850	53	67,9	2820,1	34,494529	2,27	-0,09%	-0,18%	-0,26%	-0,35%
2880	55	67,9	2837,3	44,124716	2	-0,12%	-0,24%	-0,36%	-0,47%
2910	56,23	67,9	2854,2	53,82654	1,23	-0,10%	-0,19%	-0,29%	-0,39%
2940	68	67,9	2868,2	64,209797	11,77	-1,16%	-2,31%	-3,47%	-4,63%
2970	68,23	67,9	2879,3	75,127628	0,23	-0,03%	-0,05%	-0,08%	-0,10%
3000	74,23	67,9	2888,9	86,253606	6	-0,76%	-1,52%	-2,28%	-3,04%
3030	80,23	67,9	2895,6	97,713867	6	-0,83%	-1,65%	-2,48%	-3,30%
3060	86,23	67,9	2899,1	109,38285	6	-0,84%	-1,69%	-2,53%	-3,38%

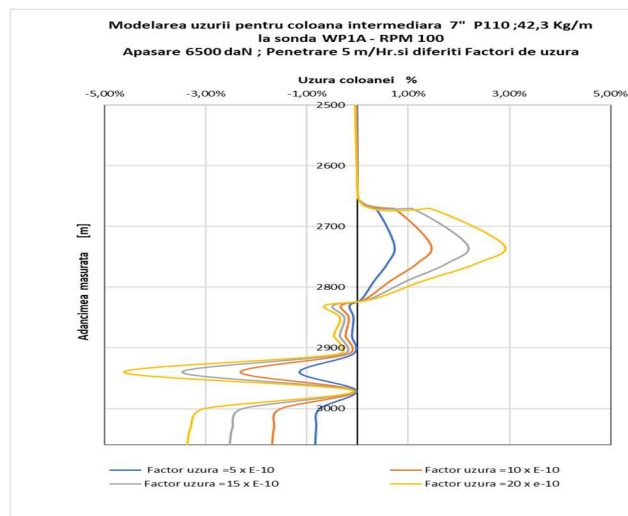


Fig. 5.11. Uzura coloanei cu creșterea factorului de uzura

6.

Concluzii și contribuții originale

Concluziile studiilor și cercetărilor efectuate, precum și contribuțiile personale ale autorului se referă la următoarele aspecte de bază:

1. Analiza, într-o manieră originală, a stadiului actual al explorării și exploatării gazelor de șist, prezentându-se, la zi, situația în România și în Europa, aspectele tehnice specifice, riscurile generate de exploatarea gazelor de șist, în comparație cu riscurile generate de exploatarea zăcămintelor de gaze clasice, precum și unele metode de evaluare și diminuare.
2. Punerea în evidență a uzurii adezive a coloanelor de burlane în timpul forajului rotary în secțiunea subsecventă, modelarea calitativă a acestei uzuri și analiza influenței parametrilor de foraj și a stării de flambaj a garniturii de foraj asupra uzurii coloanelor intermediare. Prin efectuarea unor calcule de sensibilitate se pot stabili o serie de măsuri atât pentru faza de proiectare cât și pentru faza de execuție a sondei, așa încât uzura coloanei intermediare să fie redusă la minimum (limitările tehnologice să nu fie depășite) sau coloana intermediară să fie redimensionată pe un anumit tronson sau programele de operațiuni (completare; stimulare) să fie actualizate în așa fel încât integritatea barierei constituită din coloana intermediară să nu fie compromisă.
3. Punerea în practică a unei metode noi de estimare operativă a gradului de uzură calitativă a coloanelor intermediare, constând în: aplicarea graficului API RP7G cu privire la forțele normale pe racord, în funcție de intensitatea de deviere (DLS) și sarcina imersată sub punctul considerat, pentru o geometrie bine precizată a coloanei intermediare, a racordurilor speciale, la un regim de foraj predeterminat și pentru o lungime standard de 1000 m secțiune forată subsecvent coloanei intermediare în discuție, așa după cum este explicat detaliat în **Anexa 1**, împreună cu modul de utilizare, cu avantajele care rezultă, și evident, cu limitările acestei metode.
4. Solicitarea la oboseală este un fenomen care generează efecte nedorite și neașteptate, culminând cu ruperea garniturii de foraj, pierderea ansamblului de fund (incluzând tehnica de telemetrie date) în gaura de sondă, urmată de reluări de gaură de sondă.
5. Ca urmare a solicitărilor la oboseală, materialul prăjinilor de foraj poate ceda și la 30 % din efortul la tracțiune nominal; în mediul coroziv, limitele la oboseală sunt cu 40 % mai mici decât în mediile necorozive.
6. Intensitățile maxime de deviere ale găurilor de sondă (așa numitul *Dog Leg Severity* sau DLS) sunt fundamentale pentru inițierea și accentuarea solicitărilor la oboseală, de aceea se recomandă corectarea acelor segmente de gaură care prezintă DLS-uri cu valori ridicate.
7. Solicitarea la oboseală a garniturii de foraj depinde, în mare măsură, de combinația curbura - sarcină axială. De aceea se recomandă ca sondele să fie proiectate / executate cu punctul de inițiere al înclinării cât mai jos, așa încât sarcina axială în secțiunea intensității de deviere maxime, să fie cât mai mică.
8. Se recomandă exploatarea prăjinilor de foraj în parametri ce se găsesc deasupra curbelor stabilite de autor.
9. Se recomandă ca forțele laterale pe racord să fie, pe cât posibil, estimate și menținute la valori cât mai mici (de exemplu, între 250 și 750 daN / racord. În caz contrar, vor exista consecințe negative majore, cum ar fi: coeficienți de frecare mari; forabilitate direcțională redusă, ca urmare a disipării apăsării pe sapă; viteză mică de avansare; valori ridicate ale momentului de torsiune la masa Rotary; imposibilitatea tubării unor coloane de burlane la cotele programate; cimentări de calitate improprie cu implicațiile ce rezultă din realitate; prinderea mecanică a sapei; pierderea stabilității garniturii de foraj prin flambaj.
10. Se recomandă menținerea celor patru limitări de proiectare pentru oboseală, în conformitate cu valorile recomandate în Standardul DS-1 Drill Stem Design and Operation – TH HILL Associates inc., 3rd Edition [17].
11. Se recomandă administrarea corectă a operării garniturii de foraj de așa manieră încât numărul de cicluri rămase până la numărul maxim de cicluri admis, să fie estimat / cunoscut, astfel ca planificarea inspecțiilor garniturii de foraj să fie făcută pe baze realiste.
12. Respectarea recomandărilor de mai sus reprezintă un minimum de măsuri care, puse în practică, vor reduce semnificativ riscul producerii unor avarii în garnitura de foraj (și nu numai!) cu toate consecințele drastice care derivă din aceste avarii:

13. Setul de ecuații de forțe axiale și momente reprezintă un instrument important de proiectare și de supervizare a operațiunilor de foraj și de completare a sondelor ERD, orizontale, multilaterale sau cu rază scurtă de deviere.
14. Modelarea uzurii coloanelor, prin utilizarea acestor ecuații, este mai realistă deoarece se consideră forțele normale mai apropiate de realitate, în funcție de regimul de foraj aplicat și de traiectul realizat al sondei.
15. Prin modelarea, în faza de proiectare a uzurii coloanei intermediare, se poate dimensiona corect această coloană așa încât grosimea de perete a coloanei intermediare să fie optimă în momentul realizării programelor de stimulare a stratului productiv; a poziționării optime a capului de liner de producție și a packerelor de producție.
16. Coeficienții de frecare trebuie calibrați în permanență la fiecare BHA introdus în sondă prin citirea efectivă a sarcinii la manevra ascendentă (PUW), a sarcinii la manevra descendentă (SOW), și a sarcinii, respectiv momentului, în timpul rotirii deasupra tălpii (ROT) sau a punctului de interes.
17. Apăsarea pe sapa (WOB) trebuie permanent corelată cu starea garniturii de foraj (*Tensiune / Neutru / Flambaj*).
18. Poziția instrumentelor de impact (geală, acceleratori / amortizori ș.a.) trebuie comparată permanent cu starea garniturii de foraj în momentul care se consideră eficiența pentru operare.

 **PROIECTAREA ȘI EXECUȚIA SONDELOR SPECIALE (ERD,MLTD, SHORT RADIUS, HD2D SI 3D), FĂRĂ A UTILIZA ECUAȚIILE DE FORȚE AXIALE ȘI MOMENTE DE TORSIUNE, POATE CONDUCE LA AVARII DEOSEBIT DE GRAVE, RELUARI DE GAURĂ, PIERDERI DE LINERE, DISTRUGEREA ECHIPAMENTELOR DE FUND, SPARGERI DE COLOANE, DISTRUGERE DE CONEXIUNI, AJUNGÂNDU-SE PÂNĂ LA COMPROMITREA TOTALĂ A SONDEI.**

 Valorile de uzură și cotele unde se dezvoltă uzura la coloană, trebuie să fie foarte atent considerate atât în proiectarea sondelor, cât și în cursul lucrărilor de foraj, mai ales pentru sondele ERD, sonde orizontale, multilaterale, sonde HPHT, sonde critice H₂S, avându-se în atenție scenarii de omorâre a sondei în situații de debitare a fluidelor din strat, scenarii de stimulare a stratelor productive, programe de completare, sau orice alte operațiuni care implică presiunea de spargere și, mai ales, presiunea admisibilă de turtire a coloanei de burlane. Ca exemplu imediat poate fi situația pentru care adâncimea șanțului de uzură este de 10 % din grosimea de perete a burlanului; atunci presiunea admisibilă de colaps a burlanului respectiv va fi de 90 % din presiunea de turtire admisibilă, originală; 20 % adâncimea șanțului de uzură induce 80% presiune admisibilă de colaps ș.a. [49]. Acest aspect este foarte important pentru ciclul de viață al sondei din punct de vedere al calității sondei, pentru aspectele de risc cu privire la impactul asupra mediului, și a securității muncii. Cu alte cuvinte, neluarea în considerare a uzurii produse în coloanele intermediare ale unor sonde poate conduce la avarii, complicații grave la sondă, diminuarea drastică a programelor de stimulare, pierderi de producție, deci scăderea ratei interne de profitabilitate a companiei, pe proiectul respectiv.

Bibliografie

- [1] eia US Energy Information Administration Energy Outlook E4
- [2] ENI Scuola
- [3] Deep shale oil and gas – James G. Speight 2017
- [4] ERCB/AGS Open File Report 2008-08: An Introduction to Shale Gas Geology in Alberta
- [5] Bustin 2016
- [6] Petroleum Technology Alliance of Canada 2005
- [7] Faraj et Ali 2004
- [8] Energy and Mines Ministry of Canada Conference 2013
- [9] EUOGA Task 6b-2016
- [10] European Unconventional Oil and Gas Assessment (EUOGA) – Review of results,knowledges,gaps and Recommendations for future works 03-2017
- [11] EUOGA Task 7
- [12] EUOGA Task 3B
- [13] Agentia de Resurse Minerale a României (ANRM)

- [14] EUOGA Final Report T8-2017
- [15] Gaze de şist între nevoi energetice si standard de mediu – Institutul European din Romania – Studii Strategice si Politice SPOS 2014
- [16] Industry Recommended Practice IRP #20 Ed. 2 -2015
- [17] Alberta Energy Regulator AER Directive 036
- [18] Shale Development – Understanding and Mitigation Risks Associated with well Construction and Hydraulic Fracturing . Kris J. Nygaard – Exxon Mobil 2013
- [19] AER Directive 008
- [20] AER Directive 010
- [21] Chesapeake Energy EPA Hydraulic Fracturing workshop 2011
- [22] Drilling and hydraulic fracturing how is done responsibly - 2013
- [23] Assessment of Risks from unconventional Gas well Development in the Marcellus Shale of Western Maryland – Maryland Departament of the Environment and Department of Natural Resources Jan 2015
- [24] Hydraulic Fracturing Horizontal Wells & Unconventional Oil/Gas Resources Robert A. Bauer 2014]
- [25] A guide to Shale Gas Professor Jim Skea – Energy Institute
- [26] Modern Shale Gas Development in USA – A Primer: US Department of Energy National Energy Technology Laboratory
- [27] Legea 301/2015 privind stabilirea cerințelor de protecție a sănătății populației dpdv a substanțelor radioactive din apa potabila.
- [28] : Bourgoine et all 1991- Directional well design, trajectory and survey calculation methods – UN University 2013
- [29] : Gabolde & Nguyen 1991- Directional well design, trajectory and survey calculation methods – UN University 2013
- [30] : Drilling Data Handbook, Gabolde & Nguyen - IFP Publications 8th Edition
- [31] : Applied drilling engineering – A. Bourgouyne SPE Textbook series Vol.2 2005
- [32] : Offshore Well Construction 1st Edition Petex – University of Texas 2005
- [33] : API D20 Bulletin on directional drilling survey calculation methods and terminology 1985, Washington DC
- [34] : Borehole positionning and tortuosity standard calculation methods - Industry Steering Commitee on Wellbore Survey Accuracy ISCWA , 43rd General Meeting 2016, Fort Worth – Texas
- [35] : Schlumberger field notes
- [36] : Schlumberger oilfield Glossary
- [37] : AADE-13-FTCE-21 Borehole tortuosity effect on maximum horizontal drilling length based on advanced buckling modeling – S.Menard, Drillscan USW 2013
- [38] : Formulas and calculations for drilling operations – James G. Speight
- [39] : Introduction to wellbore positioning ISCWA,2017
- [40] : A survey of drilling cost and complexity estimation model – Mark J. Kaiser, IJPST , Nov. 2007
- [41] : API Technical Report 1PER15K-1
- [42] : Horizontal drilling comes of age – Trevor Burges Oilfield Review
- [43] : API RP 7G
- [44] : Standard DS-1 Drill Stem Design and Operation – TH HILL Associates inc., 3rd Edition,2004
- [45] Modern Applied Science Vol.4, No.2 /2010: Mohammad Fazelizadeh; Geir Hareland; Bernt Aadonoy
- [46] Referat 2 – Iunie 2018 Intensitatea de Deviere si Tortuozitate traiectului sondei – Factori generatori de oboseala pentru garniturii de foraj si generatori de complicații pentru ciclul de viață al sondei. UPG Ploiești Școală Doctorala, Dan Radacina & Lazar Avram
- [47] Real Time Torque and Drag Analysis during Directional Drilling Mohammad Fazeilazadeh -University of Calgary 2013
- [48] Casing Design manual ENI 1999
- [49] Advanced Drilling and Well technology – Bernt Aadnoy,Iain Cooper,Stefan Miska,Robert F. Mitchell, Michael L.Payne