

**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

**CONTRIBUȚII LA ELUCIDAREA MECANISMELOR CE
PROVOACĂ DEPUNERILE DE SĂRURI ÎN SONDELE DE
GAZE UTILIZÂND SIMULATOARELE NUMERICE**

**CONTRIBUTIONS TO ELUCIDATION OF MECHANISMS
WHICH PROVOKE SALT DEPOSITIONS IN DRY GAS
WELLS UTILIZING NUMERICAL SIMULATORS**

Conducător științific

Prof. univ. dr. ing. Iulian NISTOR

Doctorand

Ing. DUMITRACHE Liviu-Nicolae

PLOIEȘTI

2017

ABSTRACT

The flow of dry gas through porous media leads to the vaporization of water present within the pore space to meet thermodynamic equilibrium for given pressures, temperatures and reservoir water salinities. This vaporized and produced water leaves behind a solution which gets saltier until becoming oversaturated and solid salts starts to precipitate. Usually, this phenomenon occurs towards late exploitation life of the gas fields and can lead to diminishing wells production, total production loss or wells abandonment if the operator does not intervene in due time. There are two mechanisms which work together towards salt deposition: the first one is the vaporization of sweet water in the produced gas stream, whilst, the second one, changing pressure and temperature conditions which reduce the salt solubility in the reservoir water. In the current thesis, using commercial reservoir engineering simulators, the time at which salt precipitates has been determined to schedule a well intervention to eliminate any production losses due to salt precipitation. Moreover, the workflow quantifies the precipitated salt to optimize the well treatments and quantifies the produced water for optimizing the treatments against corrosion and cryohydrates.

Curgerea gazelor sărace prin mediile poroase conduce la vaporizarea apei prezentă în acest mediu pentru a îndeplini echilibrul termodinamic la temperaturi, presiuni și salinități ale apei de zăcământ date. Apa vaporizată și produsă lasă în urmă o soluție tot mai sărată care devine suprasaturată, iar sarea solidă începe să precipite. De regulă, acest fenomen are loc către finalul de exploatare al unui zăcământ de gaze și poate conduce la diminuarea producției sondelor sau, chiar și la abandonarea acestora dacă nu se intervine în timp util. Acest fenomen, de asemenea, se întâmplă în cazul în care injectăm un gaz uscat în acvifere saline sau zăcăminte depletate pentru înmagazinare sau, pur și simplu, captare. Sunt două mecanisme care lucrează în sensul depunerii sării: primul este evaporarea apei dulci din apa de zăcământ în amestecul gazos produs, fapt care conduce la mărirea salinității apei de zăcământ, iar, cel de-al doilea, schimbarea condițiilor de presiune și temperatură care reduce solubilitatea sării în apa de zăcământ. În lucrarea de față, folosind simulatoarele numerice comerciale de zăcământ, suntem interesați în determinarea momentului precipitării sării în vederea programării intervenției la sondă pentru a elimina pierderile de producție datorită blocării acesteia. De asemeni, metodologia de lucru prezentată cuantifică sarea precipitată în vederea proiectării eficiente a acestor tratamente, precum și cuantificarea apei produse în vederea tratării acesteia pentru prevenirea apariției criohidraților și a corozionii.

CUPRINS

	Pag.Teza	Pag.Rez
Introducere	13	5
1.Modele de simulare numerică utilizate în exploatarea zăcămintelor de gaze	15	6
1.1.Fundamente pentru simularea exploatării zăcămintelor de hidrocarburi.....	15	6
1.2.Modele analitice de prevedere a comportării în exploatare a zăcămintelor de gaze	16	6
1.2.1. Performanța în țevile de extracție	17	7
1.2.2. Performanța în dreptul perforaturilor	18	8
1.2.3. Performanța în zăcământ	20	9
1.2.4. Constrângeri operaționale și calculul profilelor de producție.....	20	10
1.3. Modele numerice de prevedere a comportării în exploatare a zăcămintelor de gaze.....	24	13
1.3.1. Proiectarea modelului de simulare	25	13
1.3.2. Construcția gridului de simulare	28	14
1.3.3. Construcția modelelor de fluide.....	29	14
1.3.4. Construcția modelului de funcții de saturație	30	15
1.3.5. Inițializarea modelului.....	31	15
1.3.6. Date referitoare la sonde.....	31	15
1.4. Analiză comparativă între modelele analitice și numerice de prevedere a comportării în exploatare a zăcămintelor de gaze. Studiu de caz	32	16
1.4.1. Relaționarea modelului analitic prezentat cu simularea numerică.....	32	16
1.4.2. Exemplu de calcul – Metoda analitică	33	16
1.4.3. Exemplu de calcul – Metoda simulării numerice.....	40	18
2. Mecanisme de depuneri de săruri în sonde. Determinarea parametrilor de intrare necesari simulării	56	21
2.1. Depunerea crustelor	56	21
2.1.1. Mecanismul formării crustei.....	56	21
2.1.2. Factori care afectează echilibrul	58	22
2.2. Mecanisme de depuneri de săruri în sonde și zăcămintele de gaze.....	59	23
2.2.1. Depunerea sării în gaura de sondă	62	24
2.2.2. Depunerea sării în vecinătatea găurii de sondă și în zăcământ.....	63	24
2.2.3. Implicațiile depunerii sării asupra procesului de exploatare al zăcămintelor	66	25
2.3. Determinarea parametrilor de intrare necesari simulării.....	68	26

2.3.1. Metodologia de lucru.....	68	26
2.3.2. Pregătirea modelului static pentru simulare	69	26
2.3.3. Pregătirea modelului dinamic pentru simulare	70	27
3. Simularea numerică a depunerilor de sare. Studii de caz.....	98	28
3.1. Simularea numerică a depunerilor de săruri în zăcamintele de gaze. Model teoretic.....	98	28
3.1.1. Prezentarea modelului sintetic	98	28
3.1.2. Metodologia de lucru.....	102	30
3.1.3. Rularea cazului de simulare de bază	102	32
3.1.4. Rularea cazului de simulare pe un sector din model.....	108	33
3.1.5. Analiza rezultatelor	114	33
3.2. Simularea numerică a depunerilor de săruri în zăcamintele de gaze. Studiu de caz.....	121	40
3.2.1. Prezentarea zăcământului	121	40
3.2.2. Modelul de simulare și analiza rezultatelor.....	126	42
Concluzii și contribuții personale.....	128	44
Bibliografie.....	134	47

INTRODUCERE

La nivel global și național, în România, anual se fac descoperiri importante de zăcăminte de gaze și, pe de altă parte, există deja în exploatare zăcăminte aflate în diverse stadii de operare: zăcăminte tinere sau mature. Când vine vorba de proiectarea exploatării zăcămintelor de gaze, în vederea studiului profitabilității investițiilor realizate în astfel de active imobilizate, unul din principalele obiective urmărite este acela de a furniza comportamentul în exploatare a sondelor forate, manifoldurilor sau grupurilor de producție, și a zăcământului în sine.

Înțelegem prin comportament în exploatare debitele de producție a tuturor fazelor produse de sondă hidrocarburi gazoase, hidrocarburi lichide sau apă, presiuni de zăcământ, presiuni dinamice de fund, presiuni dinamice de suprafață, și alți parametri de exploatare.

În prezenta lucrare se prezintă metodologiile și mijloacele cele mai comune de furnizare a acestor comportamente de exploatare la diverse nivele, precum și îmbunătățirea acestora incorporând simularea unor fenomene reale des întâlnite dar neimplementate încă pentru zăcămintele de gaze.

Aceste fenomene sunt cele de precipitare a sărurilor, $NaCl$, $CaCl_2$, sau $CaCO_3$, în stare solidă în sonde și în vecinătatea acestora și impactul lor asupra productivității sondelor.

Capitolul 1 al tezei doctorale, *Modele de simulare numerică utilizate în exploatarea zăcămintelor de gaze*, pune în evidență cele mai utilizate metodologii de livrare a profilelor de producție ce pot fi efectuate fie prin aplicarea unor metode analitice de calcul, fie prin metode numerice ce implică existența unor simulatoare de zăcământ.

Capitolul 2 al prezentei teze, *Mecanisme depunerilor de săruri în sonde. Determinarea parametrilor de intrare necesari simulării*, pune în evidență partea teoretică generală a sedimentării solidelor, sau depunerilor de cruste precum și considerentele teoretice particulare pentru sondele și zăcămintele de gaze. De asemenea, determinarea parametrilor de intrare necesari simulării acestor fenomene folosind ECLIPSE este analitic prezentată.

Capitolul 3 al tezei doctorale, *Simularea numerică a depunerilor de sare. Studii de caz*, urmărește ca, comportamentul reflectat de simulare să fie același cu mecanismele, fenomenele și principiilor termodinamice prezentate în capitolul 2. În acest capitol are loc integrarea tuturor datelor de intrare într-un model sintetic în baza căruia este pusă în evidență precipitarea sării solide.

1. MODELE DE SIMULARE NUMERICĂ UTILIZATE ÎN EXPLOATAREA ZĂCĂMINTELOR DE GAZE

1.1. FUNDAMENTE PENTRU SIMULAREA EXPLOATĂRII ZĂCĂMINTELOR DE HIDROCARBURI

Profilul de producție al oricărui zăcământ de gaze este guvernat atât de proprietățile acestuia cât și de schema de exploatare implementată. În principiu, producția poate fi prevăzută combinând principiile generale ale zăcământului și ale sondelor cu informații specifice de pe zăcământul respectiv.

Marea majoritate a simulatoarelor comerciale, atât numerice cât și analitice, sunt dezvoltate astfel încât să permită inginerului să impună condiții sofisticate de managementul sondelor când vine vorba de modul de operare al acestora.

1.2. MODELE ANALITICE DE PREVEDERE A COMPORTĂRII ÎN EXPLOATARE A ZĂCĂMINTELOR DE GAZE

Modelele analitice sunt soluții matematice ale ecuației de difuzie. Acestea sunt folosite pentru a defini fenomenul curgerii fluidelor prin zăcământ pentru anumite condiții idealizate.

Spre deosebire de modelele numerice, modelele analitice nu sunt discretizate în celule ale unui grid tridimensional, ceea ce simplifică introducerea datelor precum și reducerea timpului de analiză.

Rezultatele sunt comparabile cu cele provenite din orice simulator numeric sau cu date observate în comportamentul real al sondelor. Aceste modele pot fi considerate preliminare, iar dacă rezultatele obținute sunt promițătoare, observațiile reieșite din ele pot reprezenta date de intrare pentru o simulare numerică detaliată.

În continuare, se preia un astfel de model, prezentat de H. Asheim 1987 în lucrarea „Analytical Solution of the Gas Production Profile”. [1]

1.2.1. Performanța în țevile de extracție

Relația presiune/debit pentru gaze în țevi este bine cunoscută. Pentru curgere turbulentă, presiunea dinamică de fund, p_w , presiunea dinamică de suprafață, p_{wh} , relaționează cu debitul, q_w astfel:

$$p_w^2 + \left(\frac{p_{wh}}{F}\right)^2 = a_{21} \cdot q_w^2 \quad (1.1)$$

Parametrii F și a_{21} reprezintă parametrii specifici sondei și parametrii specifici fluidelor ce curg prin aceasta. Pentru a dezvolta cum au fost obținuți cei doi parametri, curgerea unui fluid Newtonian printr-o conductă de inclinare α poate fi descrisă de ecuația lui Bernoulli:

$$dP + \rho g \cos\alpha dL + \frac{1}{2} f \frac{\rho}{D} v^2 dL = 0 \quad (1.2)$$

Ecuația (1.2) relaționează, variația presiunii, dP , de-a lungul unei conducte de lungime, dL , diametru D , factorul de frecare Darcy-Weisbach, f , prin care curge un fluid de densitate ρ la o viteză de filtrație v . g este accelerația gravitațională, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Densitatea gazului, ρ , ce are o masă moleculară M având un factor de abatere de la legea gazelor ideale Z la o presiune p și temperatură T poate fi exprimată prin legea gazelor:

$$\rho = \frac{p M}{ZRT} \quad (1.3)$$

R reprezintă constanta generală a gazelor, $R = 8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol K}}$. Combinând ecuațiile (1.2) și (1.3), ecuația pierderilor de presiune prin frecare poate fi integrată pentru a exprima performanța de curgere prin țevile de extracție ale unei sonde. [20]

Pentru scopul nostru, această ecuație va fi rearanjată după cum urmează:

$$p_w^2 + \left(\frac{p_{wh}}{F}\right)^2 = a_{21} \cdot q_w^2 \quad (1.4)$$

Unde:

$$F = e^{-\frac{M g \cos \alpha L}{Z_t R T_t}} \quad (1.5)$$

$$a_{21} = \left(\frac{p^0 Z_t T_t}{T^0}\right)^2 \frac{1 - F^2}{g \cos \alpha} \frac{8f}{\pi^2 D^5} \quad (1.6)$$

Indicele t se referă la valori medii la nivelul conductei sau tubingului, iar exponentul 0 se referă la condiții standard de suprafață, $p^0 = 1.01325 \text{ bar}$, $T^0 = 273 \text{ K}$.

1.2.2. Performanța în dreptul perforaturilor

Curgerea gazului din zăcământ în sondă se face cu pierderi de presiune datorită forțelor viscoase și/sau inerțiale, turbulente. Cel mai des folosit model de parametrizare al acestor fenomene este acela emis de Bureau of Mines care are la bază ecuația de contra presiune. [19]

$$p_r^2 - p_w^2 = c q^m \quad (1.7)$$

Parametrii c și m vor fi determinați prin teste de curgere pe mai multe duze. Parametrul m ia valori ce se situează între 1 și 2. p_r reprezintă presiunea curentă de zăcământ.

Mai recent, ecuația lui Forcheimer [13] a câștigat popularitate. [12] Integrând această ecuație pentru curgere staționară, radială pentru un zăcământ de gaze se obține următoarea relație între presiunea de zăcământ, p_r , presiunea dinamică de fund, p_w , și debit, q_w .

$$p_r^2 - p_w^2 = a_{11} q_w + a_{22} q_w^2 \quad (1.8)$$

Parametrii a_{11} și a_{22} sunt determinați, preferabil, în urma unor teste de curgere pe mai multe duze, dar, pot fi, de asemenea, relaționați cu proprietățile rocilor și ale fluidelor precum este descris în cele ce urmează.

Ecuația lui Forcheimer (1.8) poate fi interpretată matematic ca expansiune în serie Taylor de ordinul 2 a ecuației (1.7).

Așadar, alegerea uneia dintre cele două va fi dictată de efortul de calcul depus. În cele ce urmează, ecuația lui Forcheimer (1.8) va fi folosită deoarece parametrii acesteia pot fi relaționați cu proprietățile sistemului rocă-fluid și, adițional, deoarece este mai potrivită derivărilor de mai jos.

Obținerea ecuației (1.8) este documentată în cele ce urmează. Performanța sondei în dreptul perforaturilor este descrisă de ecuația lui Forcheimer, [13], care sub formă diferențială arată:

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{k} v + \beta \rho v^2 \quad (1.9)$$

Termenul în care pierderea de presiune este de ordinul 2 este, de regulă, atribuit efectelor inerțiale atunci când curgerea are loc în mediu poros tortuos. Acest fenomen este modelat prin β , factorul de turbulență al lui Forcheimer. Acest factor poate fi măsurat în laborator. Măsurătorile au pus în evidență faptul că între β și permeabilitate pot fi identificate corelații. [13]

Aceste corelații sunt dependente de geometria mediului poros. [14]

μ reprezintă viscozitatea dinamică a fluidului, k permeabilitatea zăcământului, iar r distanța în zăcământ.

Pentru a cuantifica comportamentul sistemului în dreptul perforaturilor, dacă în ecuația (1.9) este introdusă expresia densității gazului din ecuația (1.3) de mai sus și integrată pentru curgere radială între raza de drenaj a sondei și raza sondei. Aceasta oferă următoarea relație între presiunea de zăcământ, p_r , presiunea dinamică de fund a sondei, p_w , și debitul sondei, q_w .

$$p_r^2 - p_w^2 = a_{11} q_w + a_{22} q_w^2 \quad (1.10)$$

Unde:

$$a_{11} = \left(\frac{p^0 Z_w T_w}{T^0} \right) \frac{\mu_w}{\pi k h} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (1.11)$$

$$a_{22} = \frac{\beta}{2} \left(\frac{p^0 Z_w T_w}{T^0} \right)^2 \frac{\rho^0}{(\pi h)^2} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right) \quad (1.12)$$

r_e reprezintă raza de drenaj a sondei, r_w reprezintă raza sondei, h grosimea zăcământului, T_w temperatura medie de zăcământ înregistrată în volumul de drenaj a sondei, μ_w viscozitatea medie a gazelor înregistrată în volumul de drenaj a sondei, iar Z_w factorul de abatere de la legea gazelor ideale pentru condițiile din volumul de drenaj a sondei.

1.2.3. Performanța în zăcământ

Pentru un volum constant de gaz în condiții de zăcământ, un bilanț material conduce la următoarea formulă clasică între presiunea curentă de zăcământ, p_r , presiunea inițială de zăcământ, p_i , resursa inițială de gaze, N , și producția cumulativă, G . [12]

$$\frac{p_r}{Z_r} = \frac{p_i}{Z_i} \left(1 - \frac{G}{N} \right) \quad (1.13)$$

Z_r reprezintă factorul de abatere de la legea gazelor ideale în condiții curente de zăcământ, iar Z_i Factorul de abatere de la legea gazelor ideale în momentul inițial;

Prin diferențierea ecuației (1.13), schimbarea presiunii de zăcământ, p_r , poate fi relaționată cu debitul de producție, q .

$$\frac{dp_r}{dt} = -a_3 \frac{dG}{dt} = -a_3 q \quad (1.14)$$

Unde:

$$a_3 = \frac{1}{N} \frac{p_i}{Z_i} \frac{Z_r}{1 - \left(\frac{p_r}{Z_r}\right) \left(\frac{dZ_r}{dp_r}\right)} \quad (1.15)$$

1.2.4. Constrângeri operaționale și calculul profilelor de producție

Inițial, sondele vor fi produse pe duze pentru a nu depăși capacitatea maximă de procesare a echipamentelor de suprafață, sau pentru a nu depăși valorile contractuale de furnizare a producției. Atunci când producția nu depășește potențialul absolut al sondei, un debit de producție constant, debit de platou, q_p , este menținut prin ajustarea diametrului duzei pentru a compensa declinul de presiune. Așadar, pentru perioada de platou:

$$q = q_p \quad (1.16)$$

$$\frac{dp_{wh}}{dt} < 0 \quad (1.17)$$

Până la urmă, presiunea dinamică de suprafață a sondei își va întâlni minimul determinat de contrapresiunea din sistemul de procesare sau transport de suprafață.

Cu o presiune dinamică de suprafață constantă, p_{wh} , debitul de producție va intra în declin pe măsură ce presiunea de zăcământ scade, implicit, acesta este depletat. Așadar, pentru perioada de declin:

$$\frac{dq}{dt} < 0 \quad (1.18)$$

$$p_{wh} = \underline{p_{wh}} \quad (1.19)$$

Considerând că presiunea dinamică de suprafață este constantă, curgerea va fi afectată în mod direct de presiunea de zăcământ.

Așadar, următoarea relație directă, obținută din combinarea ecuațiilor (1.1), (1.8) și (1.19), este observată între cele două:

$$p_r = (a_0 + a_1 q + a_2 q^2)^{0,5} \quad (1.20)$$

Unde:

$$a_0 = \left(\frac{p_{wh}}{F}\right)^2 \quad (1.21)$$

$$a_1 = \frac{1}{n} a_{11} \quad (1.22)$$

$$a_2 = \frac{1}{n^2} (a_{21} + a_{22}) \quad (1.23)$$

În acest caz, n sonde de aceleași dimensiuni au fost considerate. Când avem de-a face cu sonde de dimensiuni diferite, dimensiunile unei sonde medii pot fi luate în considerare și acestea vor fi cele folosite în ecuațiile de mai sus.

De notat este faptul că parametrul a_0 ține cont de contrapresiunea statică, a_1 ține cont de pierderea de presiune datorită viscozității, și a_2 de pierderile de presiune turbulente. Datorită acestei separații, orice modificări de sistem pot fi implementate în calcul cu ușurință.

I. Soluția pentru perioada de platou

În această perioadă de platou, producția este presupusă a fi constantă pentru o presiune dinamică de suprafață în declin ecuațiile conform ecuațiilor (1.16), (1.17). Perioada de platou se termină când presiunea dinamică de suprafață își atinge minimumul. Presiunea de zăcământ corespunzătoare debitului de platou și presiunii dinamice de suprafață minime este dată de ecuația (1.13). Cumulativul produs la finalul perioadei de platou este dat de relația:

$$G_p = N \left(1 - \frac{Z_i}{Z_r} \frac{p_r}{p_i} \right) \quad (1.24)$$

Pentru un debit constant de platou, durata perioadei de platou, t_p , se calculează:

$$t_p = \frac{G_p}{q_p} \quad (1.25)$$

II. Soluția pentru perioada de declin

În perioada de declin, va fi o relație directă între debit și presiunea de zăcământ dată de ecuația (1.20). Relația între schimbarea presiunii de zăcământ și debitul de curgere este obținută prin diferențierea ecuației de bilanț material, ecuația (1.14). Combinându-le pe acestea, (1.20) și (1.14), obținem ecuația diferențială ce descrie producția în decursul perioadei de declin:

$$dt = \frac{a_1}{2a_3} \frac{dq}{q(Y(q))^{0.5}} + \frac{a_2}{a_3} \frac{dq}{(Y(q))^{0.5}} \quad (1.26)$$

Unde $Y(q)$ este folosit ca prescurtare pentru:

$$Y(q) = a_0 + a_1 q + a_2 q^2 \quad (1.27)$$

Soluții analitice pentru ecuația (1.26) sunt propuse în literatura matematică.[3] Iar soluția generală este prezentată:

$$t - t_p = \frac{a_1}{2a_3(a_0)^{0,5}} \ln \frac{2a_0 + a_1q + 2(a_0Y(q))^{0,5}}{q} - \frac{(a_2)^{0,5}}{a_3} \ln \left[(a_1 + 2a_2q + 2(a_2Y(q))^{0,5}) \right] - C_o \quad (1.28)$$

Constanta de integrare, C_o , este găsită pentru debitul de producție la începutul perioadei de declin. Pentru un platou de producție, această valoare este chiar debitul de platou, q_p , așadar, această constantă devine:

$$C_o = \frac{a_1}{2a_3(a_0)^{0,5}} \ln \frac{2a_0 + a_1q_p + 2(a_0Y(q_p))^{0,5}}{q_p} - \frac{(a_2)^{0,5}}{a_3} \ln \left[a_1 + 2a_2q_p + 2(a_2Y(q_p))^{0,5} \right] \quad (1.29)$$

III. Soluția specială pentru perioada de declin – doar pierderile de presiune prin turbulență sunt considerate

Pentru sonde cu debite de gaze ridicate, pierderile de presiune (proportionale cu pătratul debitului de producție) din cauza turbulenței sunt considerabil mai mari decât cele cauzate de viscozitate. Neglijarea celor din urmă implică setarea parametrului $a_1 = 0$. Acest fapt simplifică soluția perioadei de declin:

$$q = \frac{a_0}{a_2} \sinh^{-1} \left[C_1 - \frac{a_3}{(a_2)^{0,5}} (t - t_p) \right] \quad (1.30)$$

Constanta de integrare găsită pentru condițiile la limită, conform ecuației (1.29) va fi:

$$C_1 = \sinh^{-1} \left[\left(\frac{a_2}{a_0} \right)^{0,5} q_p \right] \quad (1.31)$$

Dietz și alții au studiat comportamentul în producție al sondelor de gaze cu debite foarte mari. [4] Din aceste studii a rezultat faptul ca pofilele de producție ale acestor sonde sunt cazuri particulare ale ecuației (1.30) care la rândul ei este caz particular al ecuației (1.28).

IV. Soluția specială pentru perioada de declin – doar pierderile de presiune din cauza viscozității sunt considerate

Pierderile de presiune prin frecare din cauza viscozității sunt direct proporționale cu debitul de curgere. Deși efectul turbulenței poate domina inițial, pierderile datorită viscozității devin importante pe măsură ce debitele de curgere scad, implicit zăcămintul devine depletat și

este aproape de abandonare. Pentru multe sonde care nu au debite de producție importante, aceste fenomene pot predomina întreaga lor perioadă de exploatare.

Dacă neglijăm pierderile de presiune din cauza turbulenței, așadar stabilirea parametrului $a_2 = 0$, soluția simplificată obținută este:

$$q = \frac{4 C_2 a_0}{[C_2 - a_1 e^{-a_4(t-t_p)}]^2} e^{-a_4(t-t_p)} \quad (1.32)$$

Unde coeficientul de declin, a_4 , și constanta de integrare, C_2 , sunt definite ca:

$$a_4 = \frac{2a_3(a_0)^{0.5}}{a_1} \quad (1.33)$$

$$C_2 = \frac{2a_0 + a_1 q_p + 2(a_0(a_0 + a_1 q_p))^{0.5}}{q_p} \quad (1.34)$$

1.3. MODELE NUMERICE DE PREVEDERE A COMPORTĂRII ÎN EXPLOATARE A ZĂCĂMINTELOR DE GAZE

Simularea numerică a exploatării zăcămintelor de hidrocarburi este practică de la începutul anilor 1960 ca și metodologie pentru estimarea comportamentului viitor al zăcămintelor. Înaintea acestora, calculațiile în ingineria de zăcământ erau efectuate în baza modelelor analitice. [2] Apariția simulării numerice a zăcămintelor este strâns legată de disponibilitatea unor mașini de calcul digitale și evoluția tehnicilor numerice de rezolvare a ecuațiilor cu diferențe finite ce descriu curgerea multifazică prin mediul poros eterogen atât în spațiu bidimensional, 2D, cât și în spațiu tridimensional, 3D. [2] În ciuda celor afirmate mai sus, simulatoarele numerice sunt doar instrumente ce sunt utilizate de indivizi în sarcinile lor zilnice pentru a furniza răspunsuri concrete și rapide la provocările cu care aceștia au de-a face în concordanță cu datele introduse.

1.3.1. Proiectarea modelului de simulare

Odată luată decizia realizării unui studiu de simulare, următoarea etapă este aceea de a schița modelul de simulare. Această fază implică selecția tipului de geometrie ce va fi utilizată, dacă va fi un model 1D, 2D, 3D, alegerea simulatorului, black-oil, compozițional, miscibil, termic sau chimic, etc. Acești termeni sunt dezvoltati în paragrafele de mai jos. [2]

În această privință, factorii urmăriți a fi luați în considerare sunt:

- Procesul de recuperare din zăcământ – acesta este cel mai important parametru, deoarece modelul trebuie să fie apt să reproducă principalele mecanisme de dislocuire din zăcământ.
- Calitatea și tipul informațiilor disponibile – acestea influențează nivelul de detaliu impus modelului. Zăcămintele complexe precum și descrieri precare ale fluidelor pot genera soluții neadevărate care pot genera studii greșite.
- Tipul răspunsului căutat – în cele mai multe studii, răspunsul căutat este unul simplu, așadar studiul respectiv va fi menținut la același nivel.
- Resursele disponibile – studiul trebuie măsurat împotriva resurselor umane, economice și tehnologice disponibile.

Această analiză preliminară va ajuta în definirea gradului de complexitate pentru orice studiu. Ideea de bază care ar trebui să troneze în schițarea unui studiu de simulare este că modelul trebuie menținut cât mai simplu posibil pentru a întruni obiectivele necesare.[2]

1.3.2. Construcția gridului de simulare

Construirea gridului pentru simularea numerică este unul din cei mai importanți pași ai unui studiu integrat. Aici este reflectată reprezentarea geologică a zăcământului atât în ceea ce privește forma externă cât și eterogenitățile ale proprietăților la scară macro printr-un model simplificat geometric. [2]

Dintr-un punct de vedere general, este important a se respecta descrierea geologică pe cât de mult posibil și prezervarea barierelor de curgere prezente prin discontinuități interne. De asemenea, gridul trebuie să reflecte structura zăcământului, adică toate faliile trebuie introduse, iar săriturile acestora reflectate pentru a păstra gradul de compartimentare fizic al zăcământului, așadar definirea corespunzătoare a regiunilor hidrodinamice.

1.3.3. Construcția modelelor de fluide

Odată prelevate probe din zăcământ sau de la suprafață ce sunt readuse în condiții de zăcământ, o analiză minuțioasă a acestora într-un laborator PVT va fi efectuată pentru determinarea compoziției precum și a variației unor parametri cheie cu presiunea precum: factorul de volum al țiteiului, factorul de volum al apei, factorul de volum al gazelor, rația de soluție, viscozitatea țiteiului, viscozitatea apei, viscozitatea gazelor, compresibilitatea gazelor, compresibilitatea țiteiului, compresibilitatea apei, densitatea țiteiului, densitatea gazelor în condiții standard, densitatea apei în condiții standard și presiunea de saturație.

Dacă această analiză nu a fost realizată, iar fluidul este unul simplu în baza unor proprietăți măsurate precum densitatea fazelor pot fi selectate anumite corelări existente în industrie, iar inputul necesar modelului de fluide pentru simulare este obținut.

1.3.4. Construcția modelului de funcții de saturație

În cazul curgerii multifazice, permeabilitatea absolută obținută la pasul anterior trebuie transformată în permeabilitate efectivă pentru fazele ce curg. Acest lucru se realizează în baza curbilor de permeabilități relative. Acestea sunt realizate în urma măsurătorilor speciale ce au loc pe carote în laboratoare prin analize de tip SCAL. SCAL este prescurtarea în limba engleză pentru special core analysis – analize speciale realizate pe carote. În cazul în care aceste analize nu sunt disponibile, pot fi selectate curbe similare din literatura de specialitate în baza tipurilor de roci existente în zăcământ.

1.3.5. Inițializarea modelului

Procesul de aducere a modelului în condițiile inițiale de zăcământ, înainte ca prima sondă să fie săpată și produsă, poartă denumirea de inițializare a modelului. Pe lângă datele furnizate până acum simulatorului, date adiționale sunt necesare. Acestea sunt: presiunea de referință pentru țitei la o anumită adâncime dată, adâncimea contactului apă țitei, adâncimea contactului țitei gaz, adâncimea contactului gaz apă, după caz.

În urma acestei etape, fiecare celulă a modelului 3D va avea o saturație în apă, în țitei, în gaz, și presiune inițială. Așadar, un calcul de resursă poate fi efectuat în vederea determinării resurselor inițiale în hidrocarburi. [22]

1.3.6. Date referitoare la sonde

Locațiile fizice ale sondelor, echipările acestora, coloana de exploatare, garnitura de țevi de extracție, packere, perforaturi, etc. se vor introduce în simulare. De asemenea, strategiile de exploatare prin care se specifică debitele, presiunile dinamice de fund sau de suprafață se vor introduce în simulare. Aceste strategii pot fi unele complexe care pot genera acțiuni de închidere a unor perforaturi sau sonde atunci când anumiți parametri precum rațiile gaze țitei sau apă țitei depășesc anumite valori specificate de utilizator. Sonde noi pot fi săpate sau perforaturi deschise atunci când anumite condiții nu mai sunt îndeplinite – debitele scad sub o anumită limită, etc.

1.4. ANALIZĂ COMPARATIVĂ ÎNTRE MODELELE ANALITICE ȘI NUMERICE DE PREVEDERE A COMPORTĂRII ÎN EXPLOATARE A ZĂCĂMINTELOR DE GAZE. STUDIU DE CAZ

1.4.1. Relaționarea modelului analitic prezentat cu simularea numerică

Conform lui H. Asheim în lucrarea “Analytical Solution of the Gas Production Profile”, acest model oferă o soluție analitică la o problemă care de regulă este rezolvată prin simulare numerică. În vederea demonstrării celor enunțate mai sus și în subcapitolele 2, și 3, același zăcământ este supus metodei analitice și metodei numerice pentru obținerea profilelor de producție de gaze pentru zăcământ. Pentru simplitate, zăcământul prezentat de H. Asheim în lucrarea „Analytical Solution of the Gas Production Profile” este preluat și analizat prin prisma celor două metode de rezolvare.

1.4.2. Exemplu de calcul – Metoda analitică

Proprietățile acestui zăcământ de gaze paralelipipedic precum, caracteristicile sondelor de producție, și valori ale presiunilor și temperaturilor întâlnite de gazul produs către suprafață sunt redate mai jos:

- Resursa inițială de gaze, N : $2.9 \cdot 10^{10} \text{ Sm}^3$;
- Suprafața zăcământului : $1.5 \cdot 10^7 \text{ m}^2$;
- Grosimea zăcământului, h : 39 m ;
- Permeabilitatea medie efectivă, k : $0.059 (\mu\text{m})^2 = 5.9 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$;
- Presiunea inițială, p_i : $676 \text{ bar} = 676 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- Factorul de abatere de la idealitate inițial, Z_i : 1.4
- Temperatura inițială, T_w : 423 K
- Adâncimea zăcământului : 3600 m
- Masa moleculară a gazului, M : 19.7 kg/kmol
- Temperatura pseudo critică, T_{cr} : 231 K
- Presiunea pseudo critică, p_{cr} : $45.9 \text{ bar} = 45.9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- Factor de turbulență Forcheimer, β : necunoscut, presupus negliabil;
- Factorul de frecare Darcy-Weisbach, f : necunoscut, presupus negliabil;
- Forma geometrică sau structura zăcământului : paralelipiped;

- Distribuția proprietăților în spațiul 3D : omogenă.

Parametrii de dezvoltare considerați:

- Numărul sondelor productive, n : 3
- Raza efectivă a sondei, r_w : 0.15 m
- Raza de drenaj, r_e : 1262 m
- Debitul de producție platou/zăcământ, $q_p \cdot n$: 69.4 Sm³/s
- Debitul de abandonare/zăcământ : 6 Sm³/s
- Presiunea dinamică de suprafață minimă, p_{wh} : 80 bar = 80 · 10⁵ Pa
- Presiunea în condiții standard de suprafață, p^0 : 1.01325 bar = 1.01325 · 10⁵ Pa
- Temperatura de suprafață, T_{wh} : 373 K
- Temperatura în condiții standard de suprafață, T^0 : 288.15 K

Tabelul 1.1. Profilul de producție al zăcământului determinat prin metoda analitică

t	t	Debit	Limita economică	t	t	Debit	Limita econ
ani	secunde	Sm ³ /s	Sm ³ /s	ani	secunde	Sm ³ /s	Sm ³ /s
0	0	69.4	6	8	2.52E+08	69.4	6
1	31,536,000	69.4	6	9	2.84E+08	69.4	6
2	63,072,000	69.4	6	9.32	2.94E+08	69.4	6
3	94,608,000	69.4	6	9.5	3E+08	54.22	6
4	1.26E+08	69.4	6	10	3.15E+08	29.39	6
5	1.58E+08	69.4	6	10.5	3.31E+08	16.54	6
6	1.89E+08	69.4	6	11	3.47E+08	9.51	6
7	2.21E+08	69.4	6	11.5	3.63E+08	5.53	6
8	2.52E+08	69.4	6	12	3.78E+08	3.24	6

Analizând Tabelul 1.1 și, respectiv, Figura 1.1, observăm că lungimea platoului zăcământului este de aproximativ 9.5 ani, în care debitul zăcământului este de 69.4 Sm³/s sau 5,996,160 Sm³/zi.

După perioada de platou, energia de zăcământ nu mai este suficientă pentru menținerea acestuia și se instaurează declinul.

În acest timp, debitul de gaze produse din zăcământ scade până la o valoare mai mică decât limita economică de producție.

Această limită de producție este atinsă după aproximativ 11.5 ani de la începutul producției de gaze din acest zăcământ. Profilul de producție al zăcământului este reprezentat prin curba albastră în Figura 1.1.

Limita de producție sub care exploatarea nu mai este economică este de $6 \text{ Sm}^3/\text{s}$ sau $518,400 \text{ Sm}^3/\text{zi}$ și este prezentată în Figura 1.1 prin linie portocalie.

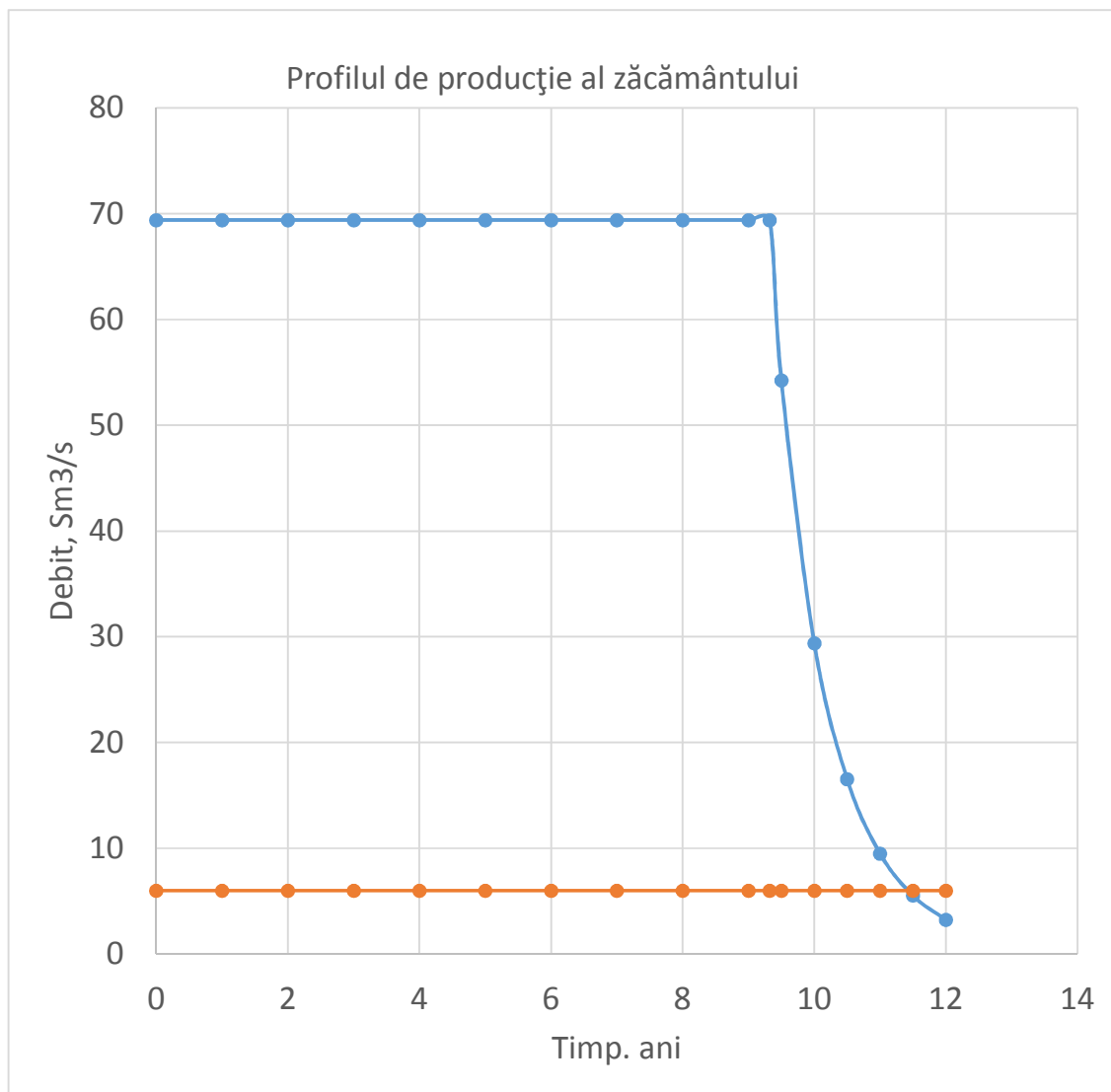


Figura 1.1. Profilul de producție al zăcământului analizat determinat prin metoda analitică

1.4.3. Exemplu de calcul – Metoda simulării numerice

Pentru această etapă au fost folosite instrumentele Petrel pe post de pre/post procesor și ECLIPSE pe post de procesor – simulator. Aceste instrumente software sunt produse de compania Schlumberger.

ECLIPSE este simulatorul de referință al industriei petroliere. Acesta a început să fie dezvoltat în 1983 în Marea Britanie în limbajul de programare FORTRAN. Prescurtarea ECLIPSE se dezvoltă prin Exploration Consultants Limited Implicit Program for Simulation Engineering. ECLIPSE primește datele de intrare sub forma unui fișier text cu extensia *.data*

structurat în 8 secțiuni dintre care 6 sunt obligatorii și 3 sunt opționale. Secțiunile cuprind cuvinte cheie prin intermediul cărora se introduc valorile asociate datelor de intrare în simulare.

Având în vedere că etapele necesare realizării acestui exemplu au fost menționate anterior în subcapitolul 1.3., *Modele numerice de prevedere a comportării în exploatare a zăcămintelor de gaze*, se vor prezenta sumar metodele de introducere a datelor de intrare în simulare sub forma unor modele precum și rezultatele reieșite din aceasta.

Resursa raportată este: $N = 2.87 \cdot 10^{10} \text{ Sm}^3$. Această valoare este foarte apropiată, practic aceeași, de exemplul rezolvat analitic și prezentat în capitolul 1.4.2, $N = 2.9 \cdot 10^{10} \text{ Sm}^3$. Presiunea inițială de zăcământ, 675 bar, este de asemenea confirmată în Figura 1.2 precum și volumul de pori, 106,704,004 m^3 , la această presiune și temperatura de zăcământ.

```

1 ***** 1
BALANCE AT 0.00 DAYS *CASE * ECLIPSE VERSION 2014.2
REPORT 0 1 JAN 1980 * RUN * RUN AT 23:02 ON 28 MAY 2015
*****

```

=====						
FIELD TOTALS						
PAV = 675.19 BARSA						
PORV= 106704004. RM3						
(PRESSURE IS WEIGHTED BY HYDROCARBON PORE VOLUME:						
PORE VOLUMES ARE TAKEN AT REFERENCE CONDITIONS):						
	OIL	SM3	WAT	SM3	GAS	SM3
	LIQUID	VAPOUR	TOTAL	TOTAL	FREE	DISSOLVED
					TOTAL	
:CURRENTLY IN PLACE		0.	0.	20312637.	28702620470.	28702620470.
:OUTFLOW THROUGH WELLS			0.	0.		0.
:WELL MATERIAL BAL. ERROR:			0.	0.		0.
:FIELD MATERIAL BAL. ERROR:			0.	0.		0.
:ORIGINALLY IN PLACE		0.	0.	20312637.	28702620470.	28702620470.
=====						

Figura 1.2. Resursa inițială de gaze reieșită din simulator

Pe modelul inițializat se introduc în simulare cele 3 sonde. Condiția de exploatare a acestora este de a produce împreună un debit de platou de 1,998,720 Sm^3/zi /sondă sau 69.4 Sm^3/s /zăcământ pentru o perioadă cât mai lungă. Din momentul declinului, exploatarea

zăcământului încetează atunci când debitul limită de $172,800 \text{ Sm}^3/\text{zi}$ /sondă sau $6 \text{ Sm}^3/\text{s}$ / zăcământ este atins.

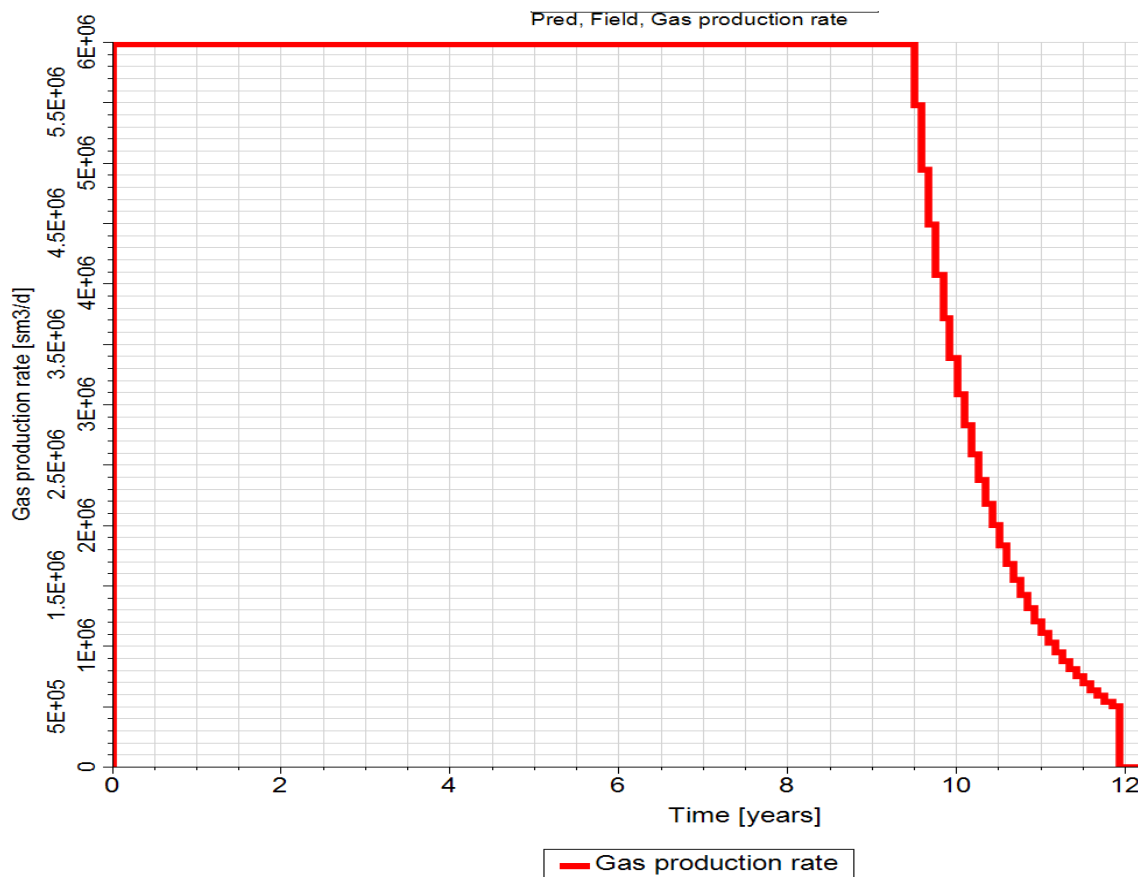


Figura 1.3. Profilul debitului de gaze al zăcământului reieșit din simulare numerică

Tabelul 1.2. Profilul de producție al zăcământului determinat prin simulare numerică

t	Debit	Limita economică	t	Debit	Limita economică
ani	Sm^3/s	Sm^3/s			
0.0	69.4	6	9.0	69.4	6
1.0	69.4	6	9.5	69.4	6
2.0	69.4	6	9.6	63.5	6
3.0	69.4	6	10.0	35.8	6
4.0	69.4	6	11.0	14.1	6
5.0	69.4	6	11.5	8.77	6
6.0	69.4	6	11.9	5.92	6
7.0	69.4	6	12.1	0	6
8.0	69.4	6			

Analizând Tabelul 2 și, respectiv, Figura 1.3, observăm că lungimea platoului zăcământului este de aproximativ 9.5 ani, în care debitul zăcământului este de $69.4 \text{ Sm}^3/\text{s}$ sau $5,996,160 \text{ Sm}^3/\text{zi}$ sau $1,998,720 \text{ Sm}^3/\text{zi}$ /sondă.

2. MECANISMELE DEPUNERILOR DE SĂRURI ÎN SONDE. DETERMINAREA PARAMETRILOR DE INTRARE NECESARI SIMULĂRII

2.1. DEPUNEREA CRUSTELOR

Crustele sunt compuși solizi rezultați în urma unor reacții chimice care au loc între constituenții apelor respective sau ca urmare a fenomenului de vaporizare a apei în forma pură ce conduce la cristalizarea compușilor solizi prezenți în acele ape. Prezența crustelor poate conduce la reducerea diametrului interior al conductelor de transport așa cum se observă în Figura 2.1. Acestea pot induce erori de măsurare pentru aparatele de măsură și control prezente în sistem, sau, de asemenea, pot bloca zona de filtru a sondelor și a colectorului sau zăcământului din imediata vecinătate a găurii de sondă.

Cele mai întâlnite cruste sau depuneri solide sunt:

- depunerile de carbonați (Ca, Mg);
- depunerile de sulfați (Ca, Ba, Sr);
- depunerile de cloruri (Na, Mg, K)
- compuși ai fierului (oxizi și hidroxizi).[17]

2.1.1. Mecanismul formării crustei

Mineralele dizolvate în apă sunt constituite din atomi sau grupuri de atomi ce poartă o anumită sarcină electrică.

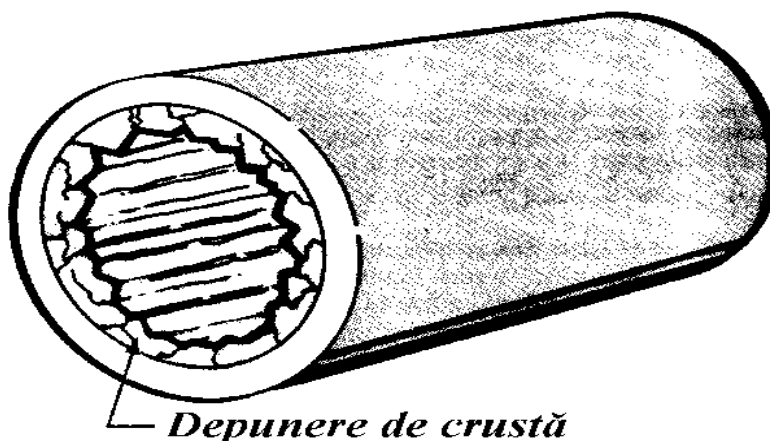


Figura 2.1. Conductă sau țevă de extracție cu depunere de cruste [17]

Acești atomi purtători de sarcină electrică sunt numiți ioni. Ionii de sarcini opuse sunt atrași unii de ceilalți. Astfel, ionii Ca^{2+} și SO_4^{2-} se vor atrage reciproc. În urma acestei atracții, ionii de Ca^{2+} și SO_4^{2-} se vor combina sau se vor lega formând o sare numită sulfat de calciu, $CaSO_4$. Această sare este, chimic, diferită de Ca^{2+} și SO_4^{2-} luați separat deoarece are un aranjament diferit al atomilor. [17]

Atunci când ionii se unesc sau se separă, se afirmă că aceștia reacționează chimic. Sulfatul de calciu se formează când ionii de Ca^{2+} și SO_4^{2-} reacționează chimic și creează o legătură. Dacă această reacție chimică este necontrolată, apa în care are loc această combinare poate, eventual, deveni suprasaturată cu sulfat de calciu și, în acest moment, particule solide de crustă, $CaSO_4$, vor fi formate.

Prezența cationilor grei în apă precum Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Na^+ .

Prin natura sa, apa de zăcământ în decursul formării zăcământului sau în deplasarea sa către sondele de producție adesea dizolvă substanțe cum ar fi sulfuri, calciu și magneziu în timp ce se află în colector. De asemenea, în momentul formării zăcământului, în bazinele în care a avut loc sedimentarea, apa prezentă conține săruri, predominant clorura de sodiu, $NaCl$, dizolvate. Așadar, în primă instanță, porii colectorului sunt ocupați cu apa prezentă în bazinul de sedimentare în momentul depunerii sedimentelor constituente ale zăcământului sau colectorului. Aceste substanțe din apă se pot combina cu formarea a diferite tipuri de săruri.

2.1.2. Factori care afectează echilibrul

Cu excepția bicarbonatului de calciu, capacitatea apei de a reține cele mai multe săruri în soluție, scade cu reducerea temperaturii. În general, dacă temperatura apei crește, ea va fi capabilă să rețină mai multe săruri în soluție. [17]

Temperatura fluidelor din zăcământ scade pe măsură ce ele se ridică la suprafață. Ca urmare, capacitatea apei de a reține săruri în soluție scade cu temperatura către suprafață. Dacă temperatura apei scade până la un punct unde apa devine suprasaturată cu săruri, sărurile vor ieși din soluție sub formă de crustă. Apa tinde să revină la starea de echilibru prin trecerea sărurilor dizolvate anterior, în crustă. Această crustă reduce cantitatea de săruri din apă. Și crusta va continua să fie produsă până ce apa atinge o nouă stare de echilibru.

Abilitatea apei de a reține săruri în soluție este afectată de cantitatea de dioxid de carbon care este dizolvată în apă. O apă cu o concentrație ridicată de dioxid de carbon poate reține mai

multe săruri în soluție decât o apă cu o concentrație scăzută. Dacă cantitatea de dioxid de carbon în apă se reduce, apa va fi capabilă să rețină mai puține săruri în soluție.

Presiunea afectează cantitatea de gaze dizolvate care poate fi absorbită în apă. Apa sub presiune ridicată poate absorbi mai mult dioxid de carbon decât apa sub presiune redusă. Presiunea fluidelor se reduce pe măsură ce ele se deplasează către suprafață

Prezența gazelor dizolvate poate afecta starea de echilibru a apei.

2.2. MECANISMELE DEPUNERILOR DE SĂRURI ÎN SONDELE ȘI ZĂCĂMINTELE DE GAZE

Curgerea gazelor sărace prin mediul poros vaporizează apa în vederea realizării echilibrului termodinamic în condițiile date de presiune, temperatură și pentru anumite salinități ale apei de zăcământ. Vaporizarea apei în mediul poros poate conduce la precipitarea sării ce cauzează reducerea porozității efective și permeabilității absolute. [16]

Conform Figura 2.2, preluată din [15], zăcămintele mature și depletate sunt cele în care problemele legate de depunerea sau precipitarea sării, $NaCl$, sunt mai des întâlnite.

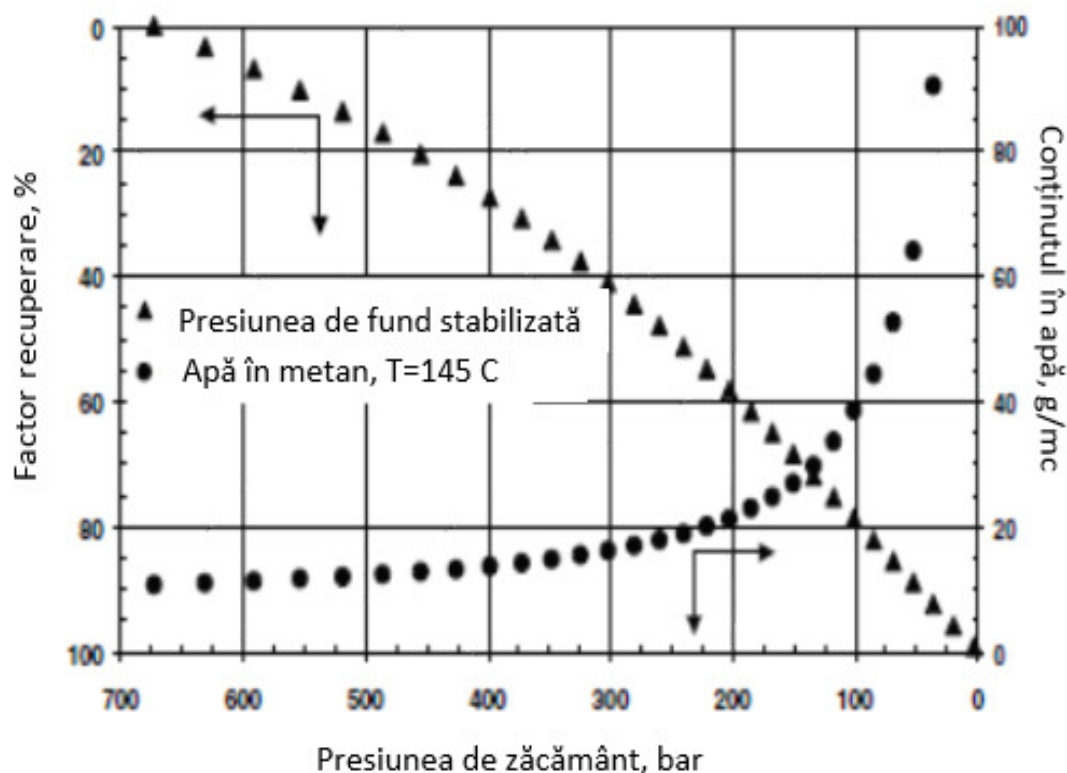


Figura 2.2. Variația factorului de recuperare și a conținutului de vapori în apă cu presiunea

După cum se observă, această creștere este tot mai accentuată pe măsură ce presiunea de zăcământ este tot mai mică.

2.2.1. Depunerea sării în gaura de sondă

Se observă în mod comun depunerea sării, $NaCl$, în gaura de sondă și în tubing, sare care este ulterior curățată periodic prin operațiuni de spălare cu apă dulce. [18] Pentru ca acest fenomen să apară, apa sărată sau mineralizată trebuie să ajungă sub această formă în gaura de sondă într-un mod continuu. [24]



Figura 2.3. Sare depusă pe pereții tubingului [24]

Din acest moment înainte, procesul va continua și sarea solidă va bloca gaura de sondă și perforaturile deschise așa cum se observă în Figura 2.3.

2.2.2. Depunerea sării în vecinătatea găurii de sondă și în zăcământ

Producerea apei vaporizate în faza gazoasă este controlată de condițiile locale din vecinătatea găurii de sondă. Gradientul de presiune ce acționează asupra formației creează o creștere bruscă a conținutului de apă în faza gazoasă care este produsă prin intermediul sondei. Acest lucru conduce la o scădere a saturației apei din porii aflați în vecinătatea sondei. Factorul ce controlează cantitatea de apă vaporizată și produsă este reprezentat de extinderea zonei deshidratate care se formează. Viteza amestecului gazos într-un zăcământ cu curgere radială către sondă scade pe măsură ce distanța măsurată din sondă către zăcământ crește. De aici, poate

fi trasă concluzia că precipitarea sării datorită vaporizării apei mineralizate în timpul producției va avea loc cu precădere în vecinătatea găurii de sondă acolo unde viteza gazului este cea mai mare. [24] Acest lucru sugerează faptul că uscarea cauzată de gazele în curgere este un mecanism care ar putea cauza vaporizarea unor cantități importante de apă ducând astfel la apariția unor blocaje semnificative în zăcămintele care conțin ape cu salinități ridicate sau grade de mineralizație crescute așa cum este prezentat în Figura 2.4. [15]

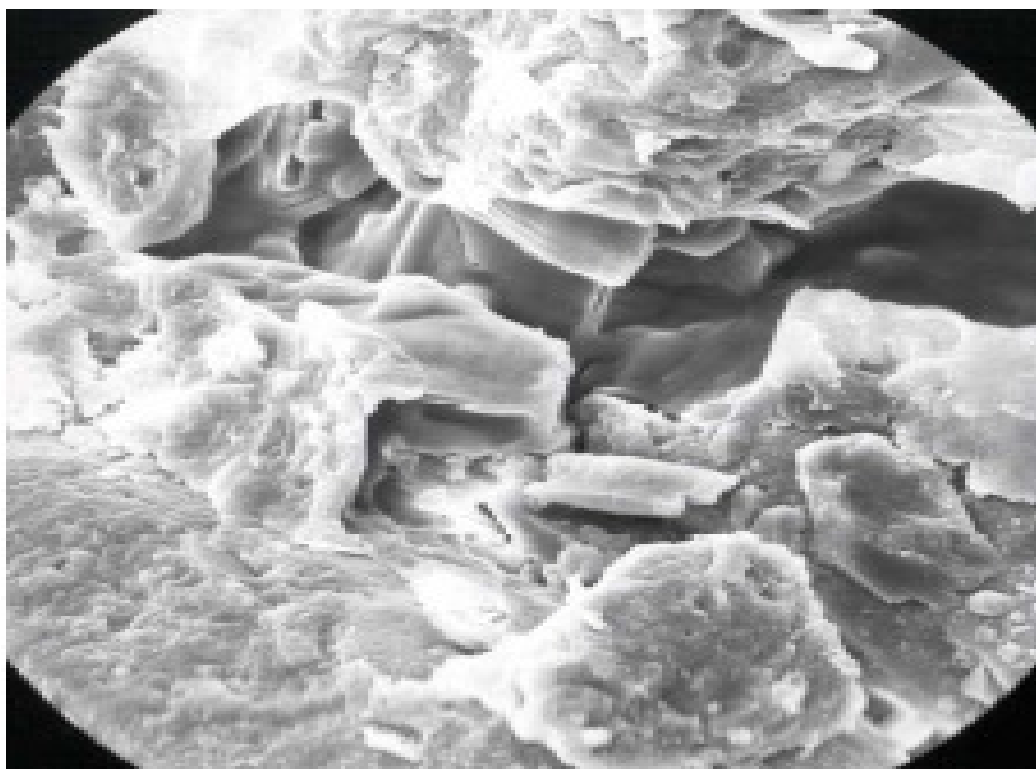


Figura 2.4. NaCl Cristalizat în interiorul porilor[15]

2.2.3. Implicațiile depunerii sării asupra procesului de exploatare al zăcămintelor

Astfel, mai jos, în Figura 2.5, pentru o astfel de sondă se prezintă variația debitului, curba verde, reprezentat pe ordonata stângă, și variația presiunii dinamice de suprafață măsurată la capul sondei, punctele albastre, reprezentate pe ordonata dreaptă în funcție de timp. [24] După cum se observă, sonda intră în producție în luna Martie a anului 2006 cu un debit mediu de circa 700 kNmc/zi . În luna Mai a aceluiași an, la numai două luni după deschidere, producția sondei scade rapid la valori de trei ori mai mici, în mai puțin de o lună. Din cele enunțate mai sus, pot fi trase următoarele concluzii: sarea precipitată din apa mineralizată de zăcământ blochează atât perforaturile cât și porii rocilor colector în zăcămintele de gaze; din acest motiv, sunt

înregistrate pierderi de producție; acestor pierderi de producție li se asociază pierderi financiare; dacă nu se intervine în timp util la sondă, acest fenomen poate conduce la blocarea perforaturilor și a spațiului poros permeabil din imediata vecinătate a găurii de sondă, și în final la abandonarea sondei.

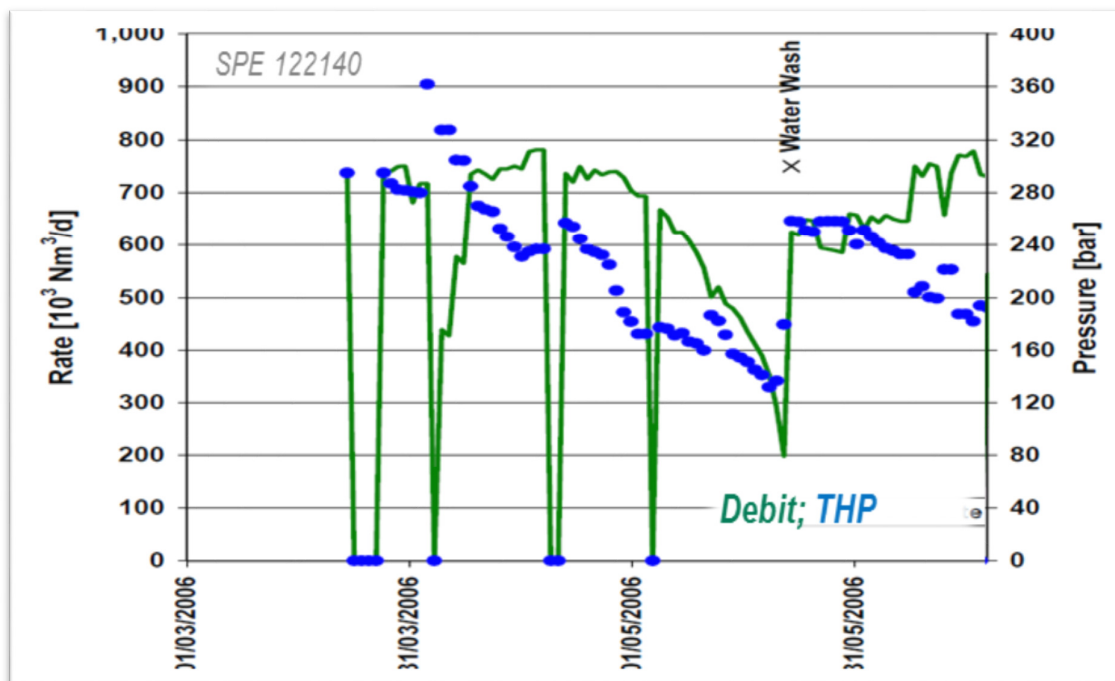


Figura 2.5. Implicația cristalizării NaCl asupra productivității unei sonde de gaze [24]

2.3. DETERMINAREA PARAMETRILOR DE INTRARE NECESARI SIMULĂRII

2.3.1. Metodologia de lucru

Simulatorul folosit va fi ECLIPSE. Opțiunile adiționale simulatorului de bază sunt *Thermal CO2STORE* și *SOLID*. *ECLIPSE CO2STORE* este un algoritm folosit pentru simularea injecției de CO_2 , în acvifere. Acesta nu permite existența hidrocarburilor în modelul de fluid utilizat. Acest neajuns este înlăturat prin folosirea algoritmului *Thermal CO2STORE*. [10] Așadar, componenții permisi în modelul de fluide vor fi: CO_2 , H_2O , $NaCl$, $CaCl_2$, $CaCO_3$, CH_4 , C_2H_6 , etc.

2.3.2. Pregătirea modelului static pentru simulare

Conform celor afirmate mai sus și în completarea subcapitolului 1.3.2, acest model va trebui să fie corespunzător unei simulări dinamice cu model de fluid Thermal. Implicit, din

cauza folosirii acestei funcții, timpul de simulare va fi unul mare. Așadar, numărul celulelor din acest model static va trebui să fie unul cât mai mic. O simulare în modul ECLIPSE Thermal necesită de asemeni informații despre proprietățile termice ale rocilor de zăcământ și fluidelor de zăcământ.

2.3.3. Pregătirea modelului dinamic pentru simulare – modelul de fluide

Deoarece fenomenele necesar a fi simulate, vaporizarea apei și, ulterior, precipitarea sării, sunt acoperite de combinația ECLIPSE THERMAL+CO2STORE+ SOLID, modelul de fluide creat va trebui să respecte cerințele necesare pentru ca această combinație să fie funcțională. Un model de fluide simplificat poate fi construit folosind 4 componenți în vederea analizei comportării simulării. Acești componenți sunt CH_4 , CO_2 , H_2O , și $NaCl$. Întrucât simularea este de tip CO2STORE, prezența CO_2 în amestecul fluid este obligatorie, cantitatea acestuia în cazul de față fiind una ne semnificativă, implicit fracția molară asociată este 0. [10] La momentul inițial, componentul solid, $NaCl$, este considerat ca și component al apei mineralizate și, când condițiile necesare precipitării sunt întâlnite, acesta va fi întâlnit în stare solidă. $NaCl$ precum și alte solide dizolvate precum $CaCl_2$, sau $CaCO_3$, (în cazul în care prezența lor se dorește a fi modelată) sunt de asemenea componenți ai apei mineralizate și pot transcende din faza lichidă/apoasă în faza gazoasă sau solidă, după caz. [11] Fazele prezente inițial în zăcământ sunt gaz, componenți hidrocarburi, și vaporii de apă, H_2O , și lichid, apa mineralizată ce conține solidele, $NaCl$, $CaCl_2$, sau $CaCO_3$, și dioxidul de carbon, CO_2 , dacă este prezent, dizolvate în aceasta. [10] În acest caz, pentru a controla echilibrul apă vapori la temperatura de zăcământ, specificată prin cuvântul cheie *KWTEMP*, este nevoie a se defini familia de cuvinte cheie *KWTABT*. În urma cercetării literaturii de specialitate, a reieșit faptul că o lucrare care abordează acest subiect al echilibrului dintre apă mineralizată și faza gazoasă pentru diferite concentrații saline este “Peng-Robinson predictions for hydrocarbons, CO_2 , N_2 , and H_2S with pure water and $NaCl$ brine” scrisă de Ingolf Soreide și Curtis H. Whitson. [21] Dacă citim descrierea modelului *GASWAT* din manualul ECLIPSE Technical Description următoarea afirmație este regăsită: “Opțiunea *GASWAT* în ECLIPSE 300 pune la dispoziția utilizatorului o metodă de modelare a interacțiunilor sistemelor amestec gazos/lichid ce are la bază o ecuație de stare. Ecuația de stare Peng Robinson este modificată folosind sugestiile lui Soreide și Whitson pentru a obține solubilitățile reciproce dintre cele două faze.” [11] Așadar, pentru a obține datele de intrare necesare pentru cuvântul cheie *KWTABTn*, un experiment virtual ce constă dintr-o singură celulă *GASWAT* poate fi utilizat.

3. SIMULAREA NUMERICĂ A DEPUNERILOR DE SARE. STUDII DE CAZ

3.1. SIMULAREA NUMERICĂ A DEPUNERILOR DE SĂRURI ÎN ZĂCĂMINTELE DE GAZE. MODELUL TEORETIC.

Până acum, deși problema depunerilor de săruri în sondele de gaze a fost abordată în diverse lucrări, nu au fost realizate investigații referitoare la abilitatea simulatoarelor de zăcământ de a modela precipitarea acestora în zăcământ și în gaura de sondă. Lucrarea de față își propune evidențierea momentului precipitării sării folosind simulatoarele numerice.

În orice studiu de zăcământ, se începe analiza întotdeauna de la simplu la complex.

3.1.1. Prezentarea modelului sintetic

Modelul teoretic constă dintr-o structură paralelipipedică de lungime 350 m, lățime 350 m, și adâncime 100 m, având 7 diviziuni pe direcția X , 7 diviziuni pe direcția Y , și 12 diviziuni pe direcția Z , precum se observă în Figura 3.1. Dimensiunile uneia dintre cele 588 de celule egale sunt $dx = 50\text{ m}$, $dy = 50\text{ m}$, $dz = 8.33\text{ m}$. Adâncimea medie a zăcământului este 2275 m. Toate aceste valori precum și valorile proprietăților statice medii distribuite în grid sunt valori apropiate de modelul zăcământului real, Laslău Mare, ce urmează să fie analizat într-un subcapitol următor. Pentru simplitate și pentru a pune în evidență anumite comportamente sunt utilizate proprietăți constante pentru parametrii statici în tot gridul. Valorile acestora sunt: porozitate: 0.2, permeabilitate orizontală: 200 mD, permeabilitate verticală: 1 mD.

O sondă de producție, ce poartă numele LND, este forată în centrul structurii și este perforată de-a lungul grosimii zăcământului, precum este prezentat în **Error! Reference source not found.**3.1.

Modelele necesare simulării dinamice au fost definite în capitolul 2 al acestei lucrări, și metodologia prezentată acolo este preluată în acest studiu. Densitatea apei de zăcământ este de 1151.25 kg/m^3 în condiții inițiale. Saturațiile inițiale în fluide au următoarele valori: saturația inițială în apă: 0.2; saturația inițială în gaze naturale: 0.8. Conform Figura 3.2, cantitățile inițiale de fluide din zăcământ sunt: 420 MStm^3 – gaze naturale reprezentate prin CH_4 ; 404664 Stm^3 – apă de zăcământ. Din Figura 3.2 reiese că presiunea medie inițială de

zăcământ are o valoare de 197 bari, iar volumul de pori la această presiune este de 2.43 MRm³.

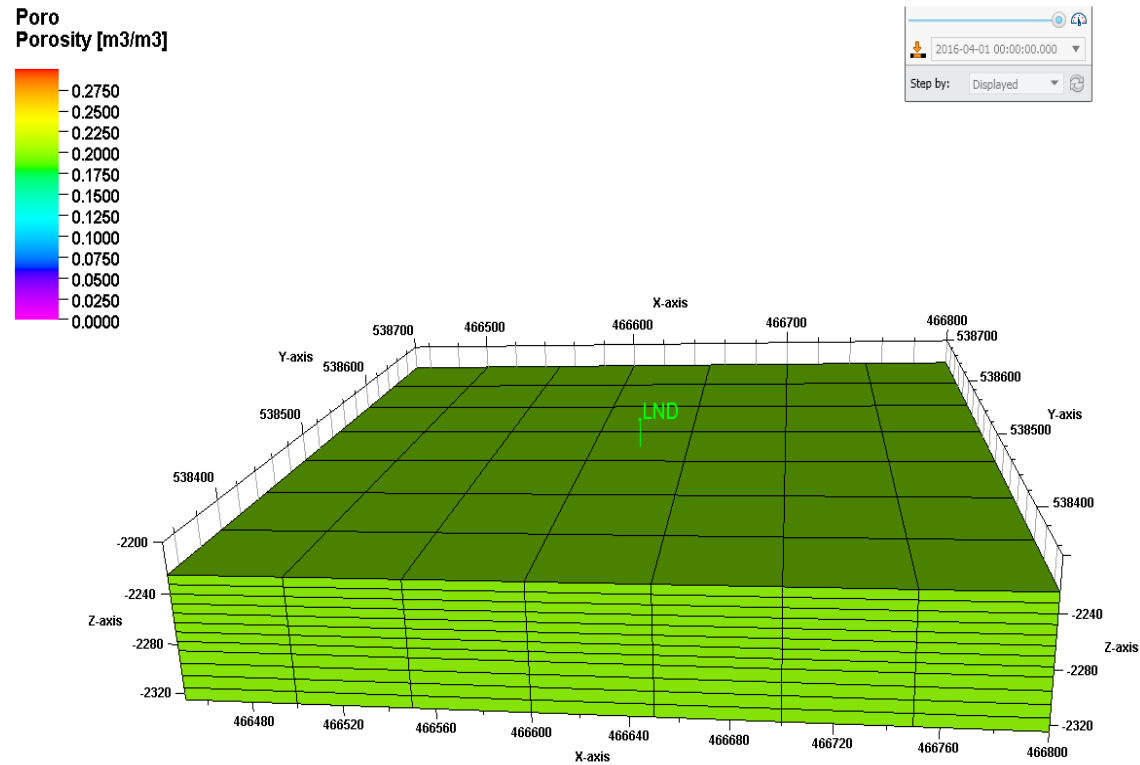


Figura 3.1. Prezentarea gridului de simulare pentru modelul sintetic

Fluid in place totals

Average pressure PV weighted:	197.130 Barsa
HCPV weighted:	197.130 Barsa
Average fluid temperature	70.000 deg C
Average HCPV temperature	70.000 deg C
Total pore volume at P(ref)	2.450000 M RM3
Total pore volume	2.430083 M RM3
Total fluid volume	2.430083 M RM3
Hydrocarbon fluid volume	1.944292 M RM3

	Moles		Surface volume		Mass	
water	24.246169	M Kg-M	404664.388786	SM3	436.794741	M Kg
HydroC	17.716918	M Kg-M	419.719425	M SM3		
	Moles		wet gas volume		Mass	
CO2	0.000000	Kg-M	0.000000	SM3	0.000000	Kg
H2O	24.246169	M Kg-M	574.399482	M SM3	436.770495	M Kg
C1	15.611726	M Kg-M	369.846769	M SM3	250.412087	M Kg
NAACL	2.105191	M Kg-M	49.872656	M SM3	123.153699	M Kg

Figura 3.2. Extras din fișierul .prt scris de ECLIPSE: confirmarea resurselor

De menționat este faptul că, în zăcământ, inițial, faza gazoasă este constituită din CH_4 , iar faza apoasă este constituită din 0.92 H_2O , apă dulce, și 0.08 $NaCl$ – fracții molare. În această fază apoasă pot fi definiți și alți componenți solizi sau gazoși dizolvați în apă precum: CO_2 , componenți hidrocarburi, $CaCl_2$ și $CaCO_3$.

3.1.2. Metodologia de lucru

1. Rularea unei simulări de bază;
2. Definirea unui sector de interes în cadrul modelului existent;
3. Capturarea condițiilor de curgere la granița sectorului;
4. Rularea modelului sector;
5. Introducerea unei zone de rezoluție mai mare în jurul sondei pentru investigarea fenomenului de precipitare a $NaCl$ în vecinătatea găurii de sondă;
6. Rularea simulării pe modelul sector de rezoluție mărită și analiza rezultatelor.

3.1.3. Rularea cazului de simulare de bază

Parametrii de operare impuși pentru sonda de producții sunt:

- Debit maxim de gaze produs: 232500 Stm^3/zi ;
- Presiune dinamică de fund minimă: 5 bar.

Se va urmări respectarea acestor parametri în decursul simulării. În exploatare, menținerea unui debit constant poate fi obținut prin utilizarea unei duze al cărei diametru permite curgerea la debit constant din sondă.

De asemeni, se va urmări producția de apă a sondei. Având în vedere ca acesta este un zăcământ de gaze sărace fără un contact apă gaz definit, implicit, așa cum s-a văzut în subcapitolul 3.1.1, toată zona este saturată cu gaze, în condițiile unei simulări normale sau chiar în condiții de zăcământ, apa lichidă nu ar curge, așadar, debitul de apă mineralizată sau apă de zăcământ ar fi 0 Stm^3/zi . Pe de altă parte, în realitate, apa sub formă de vapori este produsă, iar aceasta va condensa la suprafață. Acest comportament este urmărit a se pune în evidență și în simulare încă din cazul de bază. De asemeni, se va analiza dacă precipită solid în timpul simulării precum și evoluția parametrilor de zăcământ. Durata de simulare este de aproximativ 5 ani, din 2018 până în 2023 iar dinamica de exploatare este prezentată în Figura 3.3.

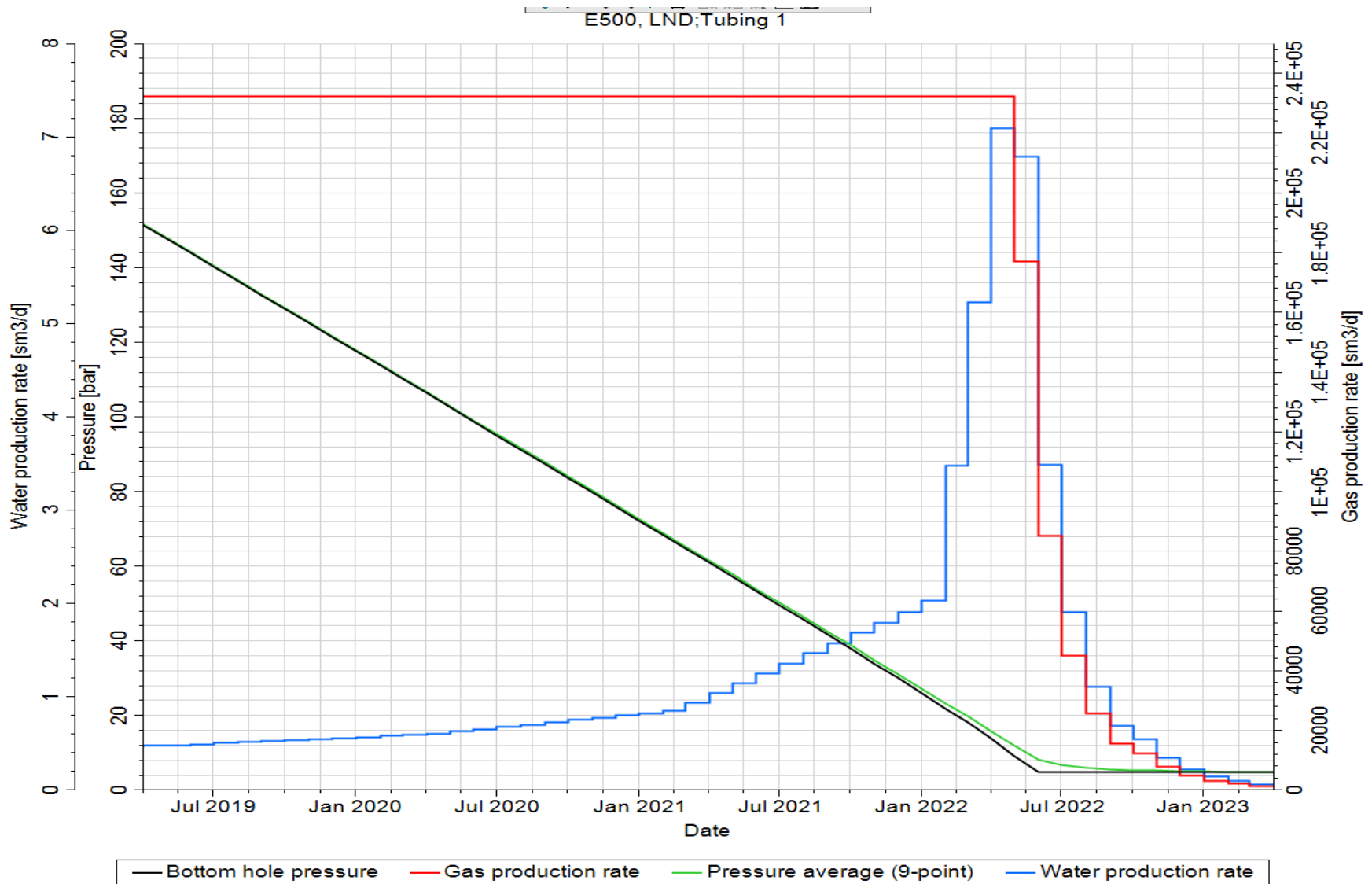


Figura 3.3. Comportamentul sondei în simulare - cazul de bază

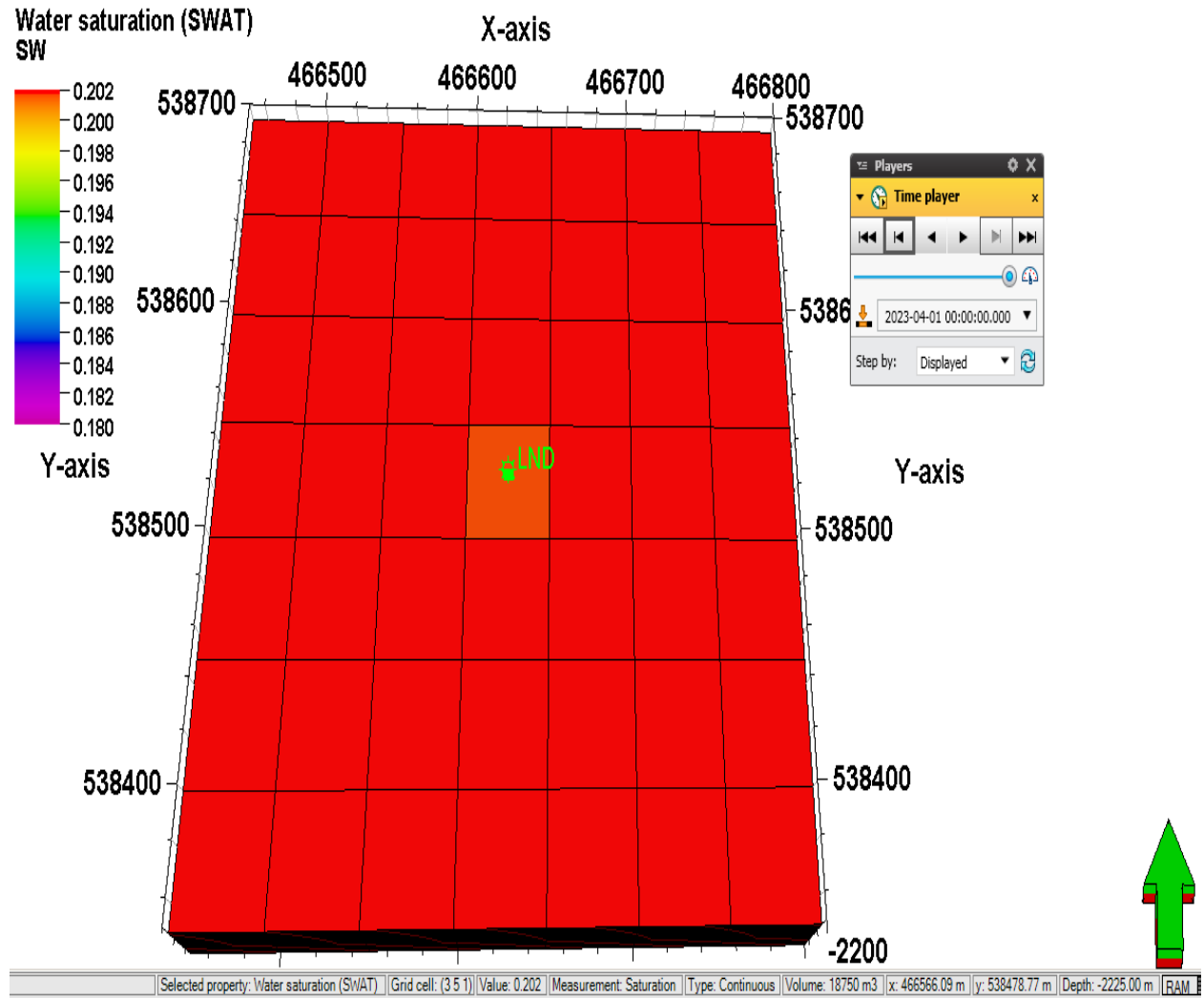


Figura 3.4. Distribuția saturației în apă la ultimul pas de timp

În Figura 3.4, putem urmări distribuția saturației în apă în spațiu la ultimul pas de timp.

Valoarea medie în toate celulele gridului cu excepția celor interceptate de sondă este de aproximativ 0.202. Se observă ca această valoare este mai mare decât saturația inițială. Acest lucru se datorează faptului că, pe măsură ce presiunea de zăcământ scade, are loc o expansiune a apei interstițiale. De asemenea, se observă că saturația în apă în celulele intersectate de sondă are o valoare diferită comparativ cu celelalte celule ale gridului. Această valoare este mai mică.

Așadar, se confirmă faptul că producția de apă vaporizată din zăcământ din vecinătatea găurii de sondă este mai mare pe motiv că depresiunea este mai mare în această zonă iar vaporizarea apei este mai puternică.

După ce este rulată simularea pentru un sector rafinat, în primă instanță, se verifică că parametri operaționali ai sondei înregistrați în cazul de bază se repetă și în acest caz al modelului sector cu rafinare.

Acest lucru asigură corectitudinea funcționării simulatorului, și, de asemenea, validarea procedurii de lucru propusă și urmată.

De asemenea, o dată efectuată verificarea de mai sus, pe acest sector rafinat pot fi rulate și alte scenarii de exploatare. Astfel, parametrii operaționali ai sondei precum debitul de gaze, sau presiunea dinamică de fund pot fi modificați pentru eficientizarea exploatării. Utilizarea modelului rafinat este într-adevăr mai de durată, dar dacă gridul original ar fi fost creat la o rezoluție precum aceea din rafinarea locală, timpul de simulare ar fi fost mult mai mare.

3.1.4. Rularea cazului de simulare pe un sector din model

După ce este rulată simularea pentru acest sector rafinat, în primă instanță, se verifică că parametri operaționali ai sondei înregistrați în cazul de bază se repetă și în acest caz al modelului sector cu rafinare. Acest lucru asigură corectitudinea funcționării simulatorului, și, de asemenea, validarea procedurii de lucru propusă și urmată. Parametri de operare ai sondei sunt reflectați în Figura 3.6.

3.1.5. Analiza rezultatelor

În decursul rulării simulării cazului de bază, nu apare mesajul care anunță precipitarea sării datorită rezoluției grosiere a gridului. Pe de altă parte, în cazul rulării gridului modificat local, următorul mesaj, **Error! Reference source not found.**, este furnizat de simulator.

```
@--Message at 1430.00000 Days 1 Mar 2022
@ solid precipitate in cell (9,9,37)
@--Message at 1430.00000 Days 1 Mar 2022
@ solid precipitate in cell (9,9,38)
@--Message at 1430.00000 Days 1 Mar 2022
@ solid precipitate in cell (9,9,39)
@--Message at 1430.00000 Days 1 Mar 2022
@ solid precipitate in cell (9,9,40)
```

Figura 3.5. Confirmarea precipitării sării în celulele gridului

În următoarea analiză se presupune că apa din faza lichidă nu se mișcă, implicit, nu curge. Pe măsură ce gazul se apropie de sondă, presiunea scade. Din acest motiv, conținutul de apă în faza gazoasă crește. Prin urmare, apa este transferată din faza lichidă în faza gazoasă. Acest proces conduce la micșorarea saturației ireductibile în apă și la creșterea salinității apei remanente.

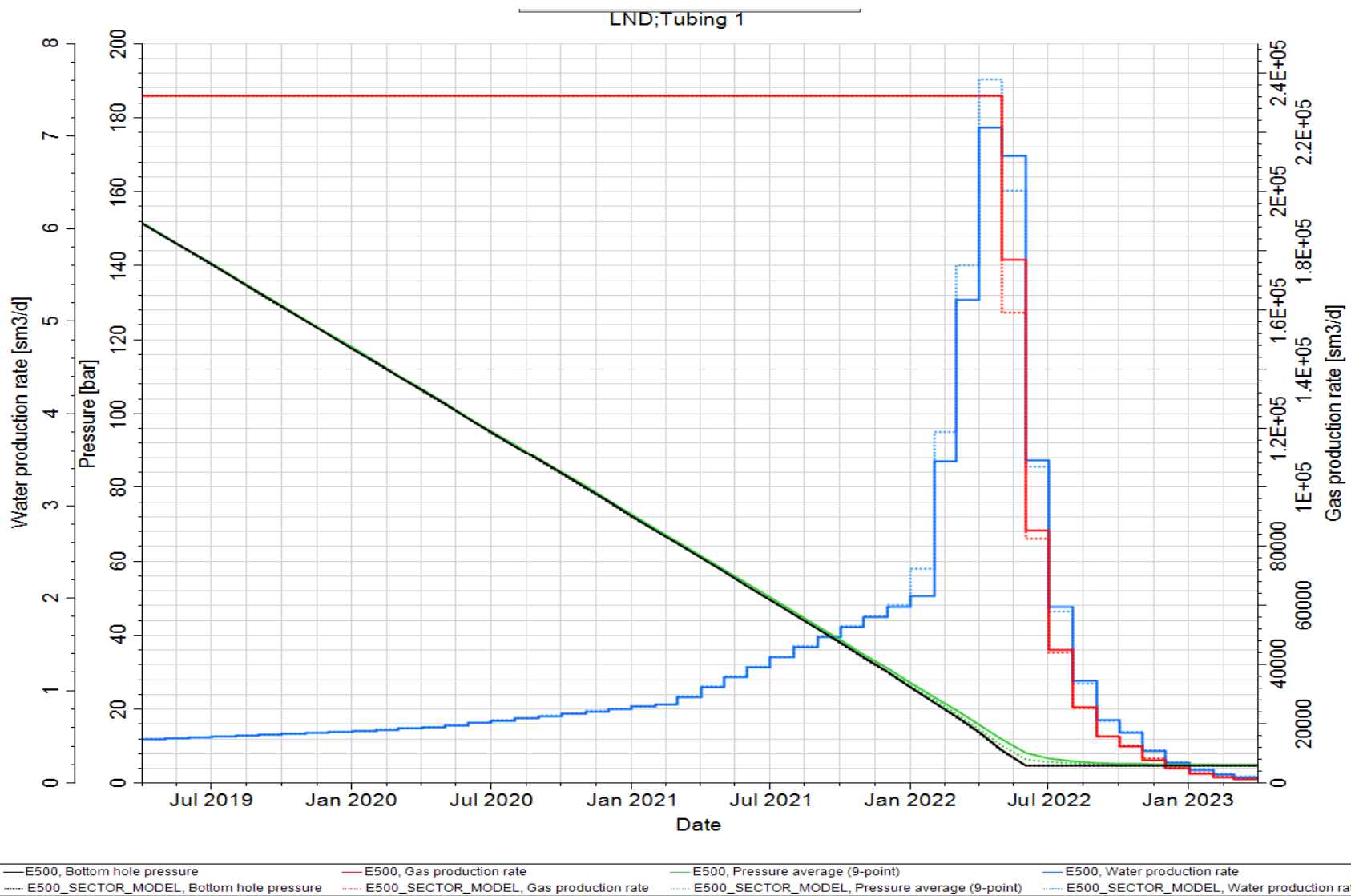


Figura 3.6. Comparație între comportamentul sondei în simulare - cazul sector rafinat (discontinuu) și cazul de bază (continuu)

Figura 3.8, Figura 3.9, și Figura 3.10 prezintă în paralel evoluția saturației în apă, densității apei de zăcământ precum și a saturației în solide la început de simulare și la final de simulare în cadrul unei secțiuni verticale de-a lungul gridului prin centrul sondei pe direcția N-S.

Această secțiune este prezentată în Figura 3..

Se observă ca la final de simulare, în marea majoritate a celulelor saturația în apă a crescut foarte puțin datorită destinderii apei reziduale cu depletarea zăcământului. Acest comportament a fost deja pus în evidență cu ajutorul modelului de bază și a fost reflectat în Figura 3.7.

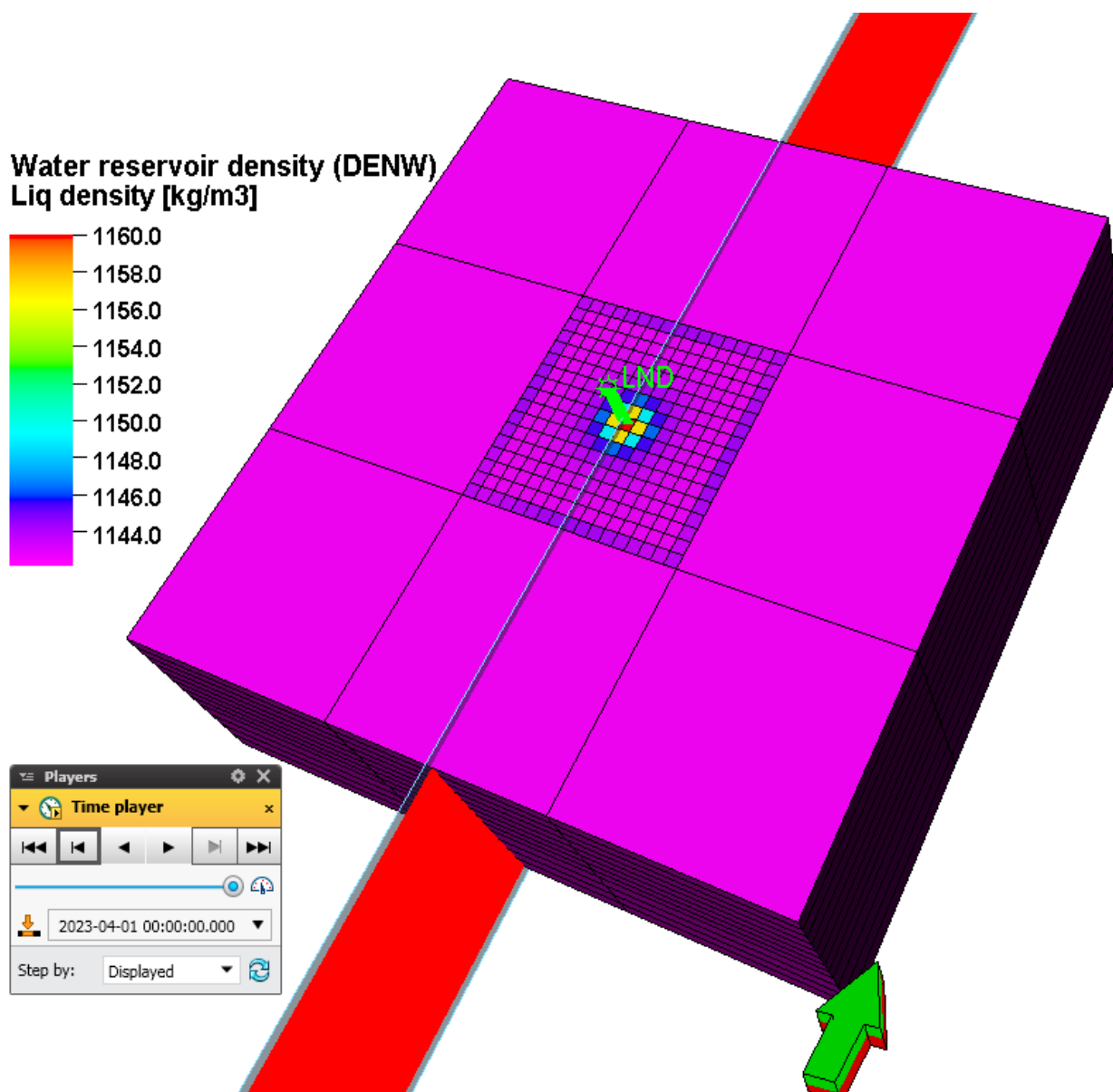


Figura 3.7. Planul de secțiune N-S prezentat peste densitatea apei la finalul simulării numerice

Pe de altă parte, în celulele traversate de sonda de producție, prin centrul gridului, prin linia imaginară ce unește punctele de 0, observăm o valoare minimă datorită vaporizării apei și producerii acesteia.

Această valoare se situează în jurul valorii de 0.18, mai mică decât valoarea inițial înregistrată de 0.2.

Apa din aceste celule afectate, conform celor menționate mai sus ar trebui să devină tot mai densă, fapt confirmat în Figura 3.7 și Figura 3.9.

În afara celulelor din vecinătatea găurii de sondă, densitatea apei de zăcământ scade pe motivul expansiunii apei, așadar, ca și în cazul saturației în apă, volumul apei crește rezultând o densitate mai mică.

Dacă densitatea inițială are o valoare aproximativă de 1151 kg/m^3 , se ajunge la valori 1184 kg/m^3 la ultimul pas de timp.

În aceste celule vor precipita solidele considerate în simulare, în cazul de față *NaCl*.

Aceste solide vor impacta capacitatea de curgere a rocii iar debitul de producție al sondelor va scădea.

În clipa în care acest lucru se întâmplă o operație de spălare trebuie executată pentru înlăturarea sărurilor depuse și restabilirea proprietăților de curgere în jurul sondelor afectate.

Pentru a vedea efectul acestui fenomen asupra debitului de producție al sondelor de gaze, în simulare se va introduce modificatori de transmisibilitate ca și funcții de saturația în solide folosind cuvântul cheie *SOLIDMMS*.

Cu cât saturația în solide este mai mare, cu atât transmisibilitatea celulei va scădea. Celulele în care sarea precipită sunt prezentate în Figura 3.10.

În acest model teoretic, *SOLIDMMS* nu a fost implementat. Acest pas fiind implementat pe studiul de caz prezentat în subcapitolul următor.

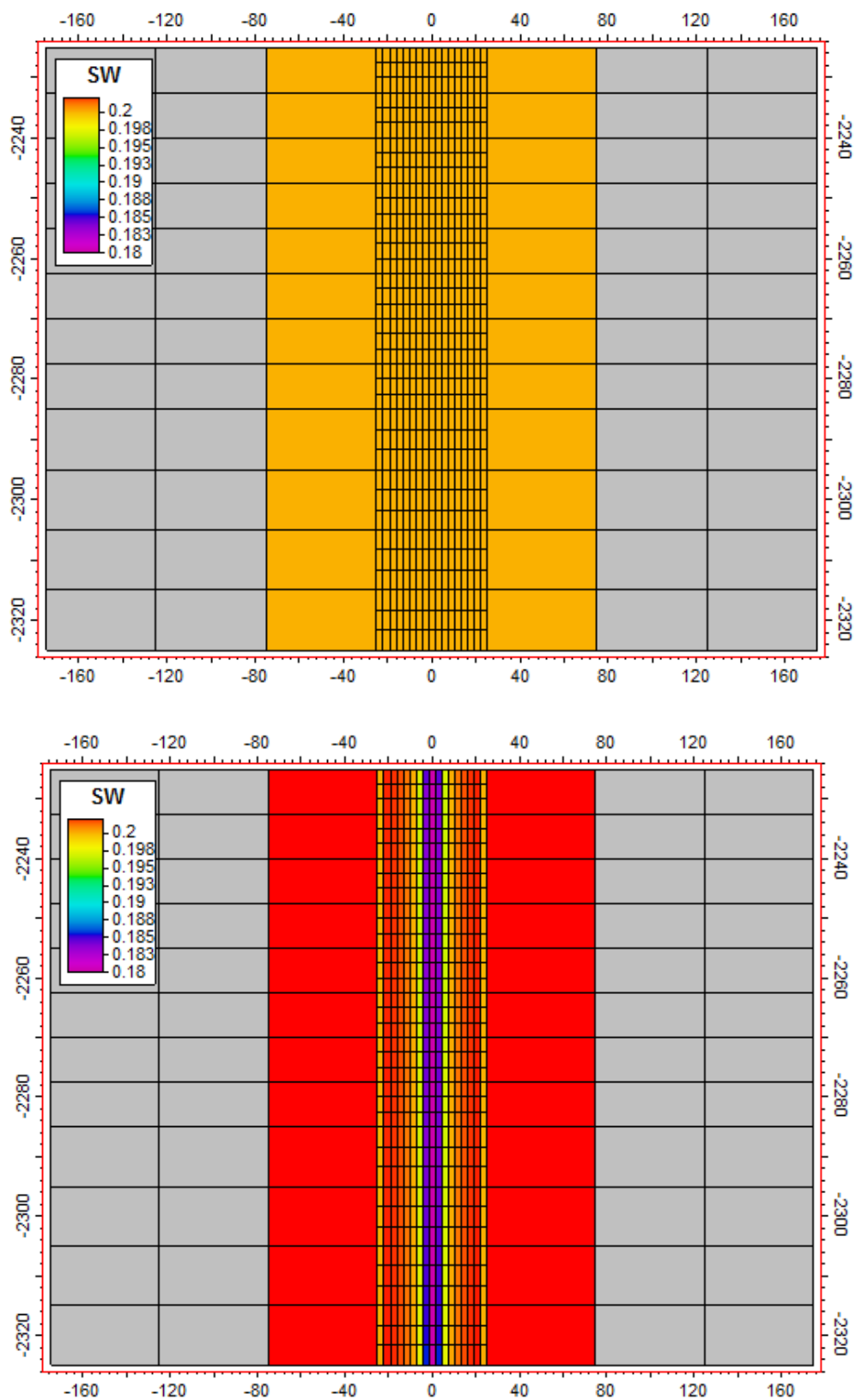


Figura 3.8. Saturația în apă la început (sus, constanta 0.2) și final de simulare (jos)

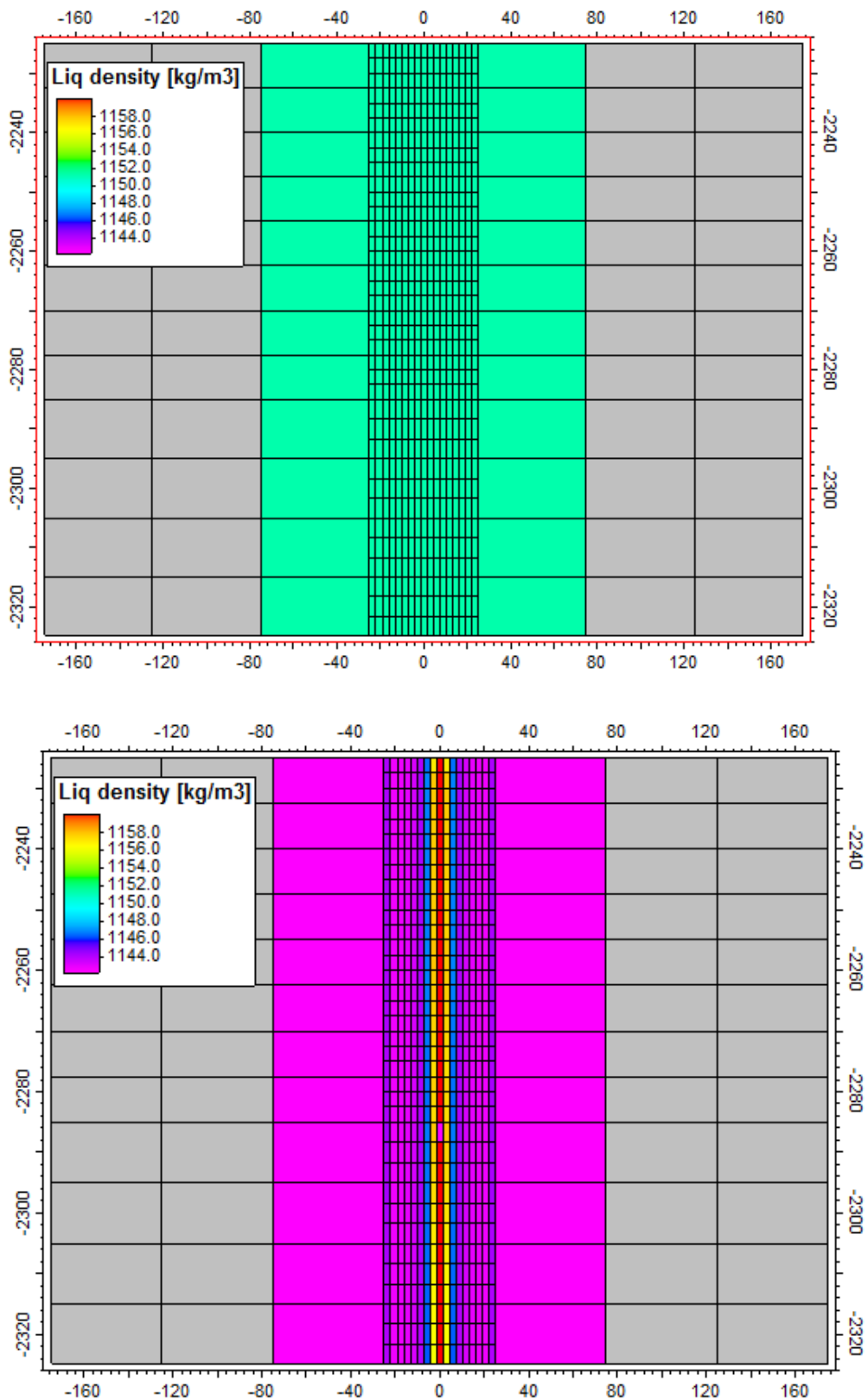


Figura 3.9. Densitatea apei de zăcământ la început (sus) și final de simulare (jos)

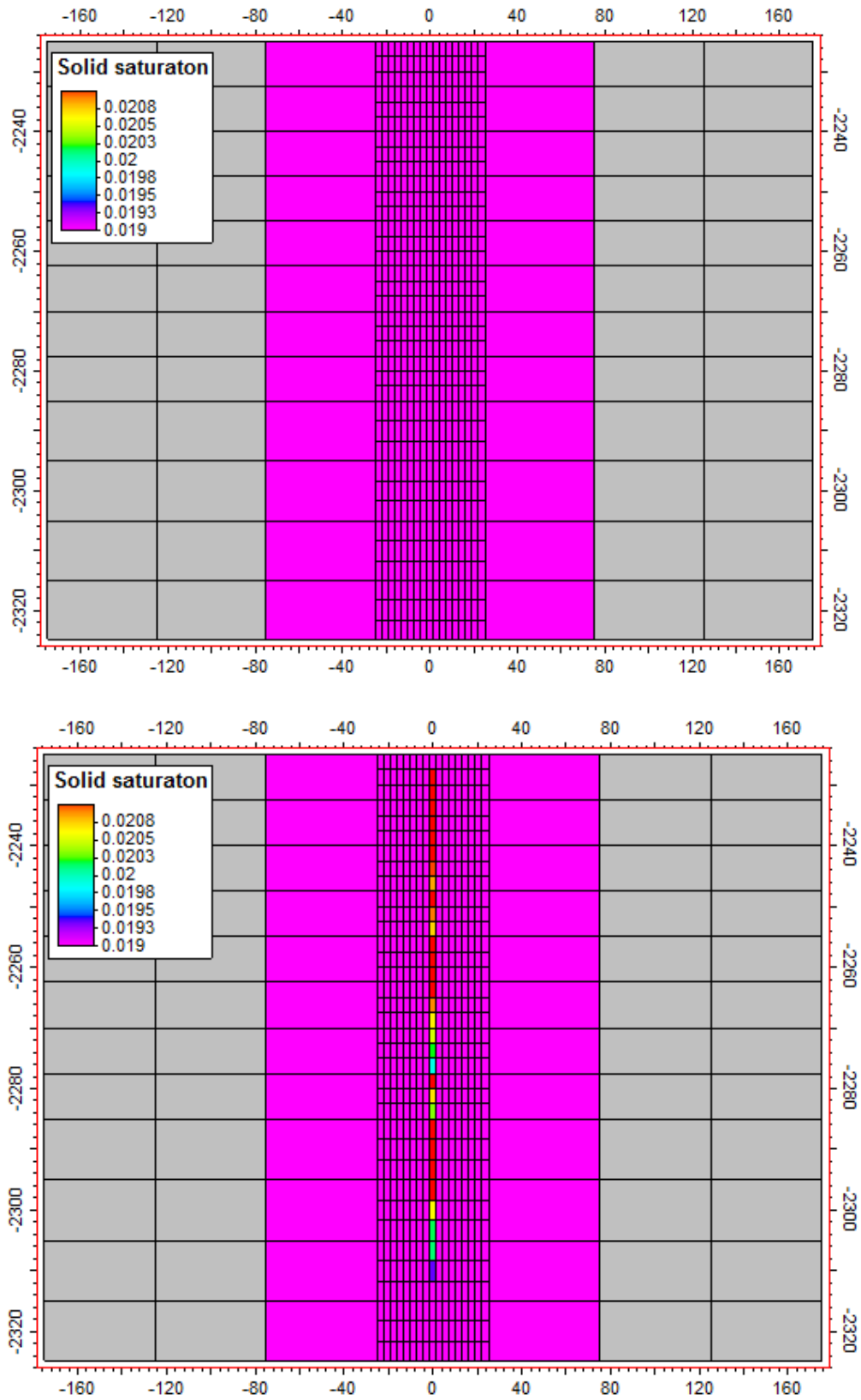


Figura 3.10. Saturația în solide la început (sus) și final de simulare (jos)

3.2. SIMULAREA NUMERICĂ A DEPUȘILOR DE SĂRURI ÎN ZĂCĂMINTELE DE GAZE. STUDIU DE CAZ

3.2.1. Prezentarea zăcământului

Zăcământul Laslău Mare este poziționat în bazinul Transilvaniei, conform Figura 3.11, și este un zăcământ stratiform boltit, Figura 3., ce produce gaze sărace din mai multe obiective. [23]

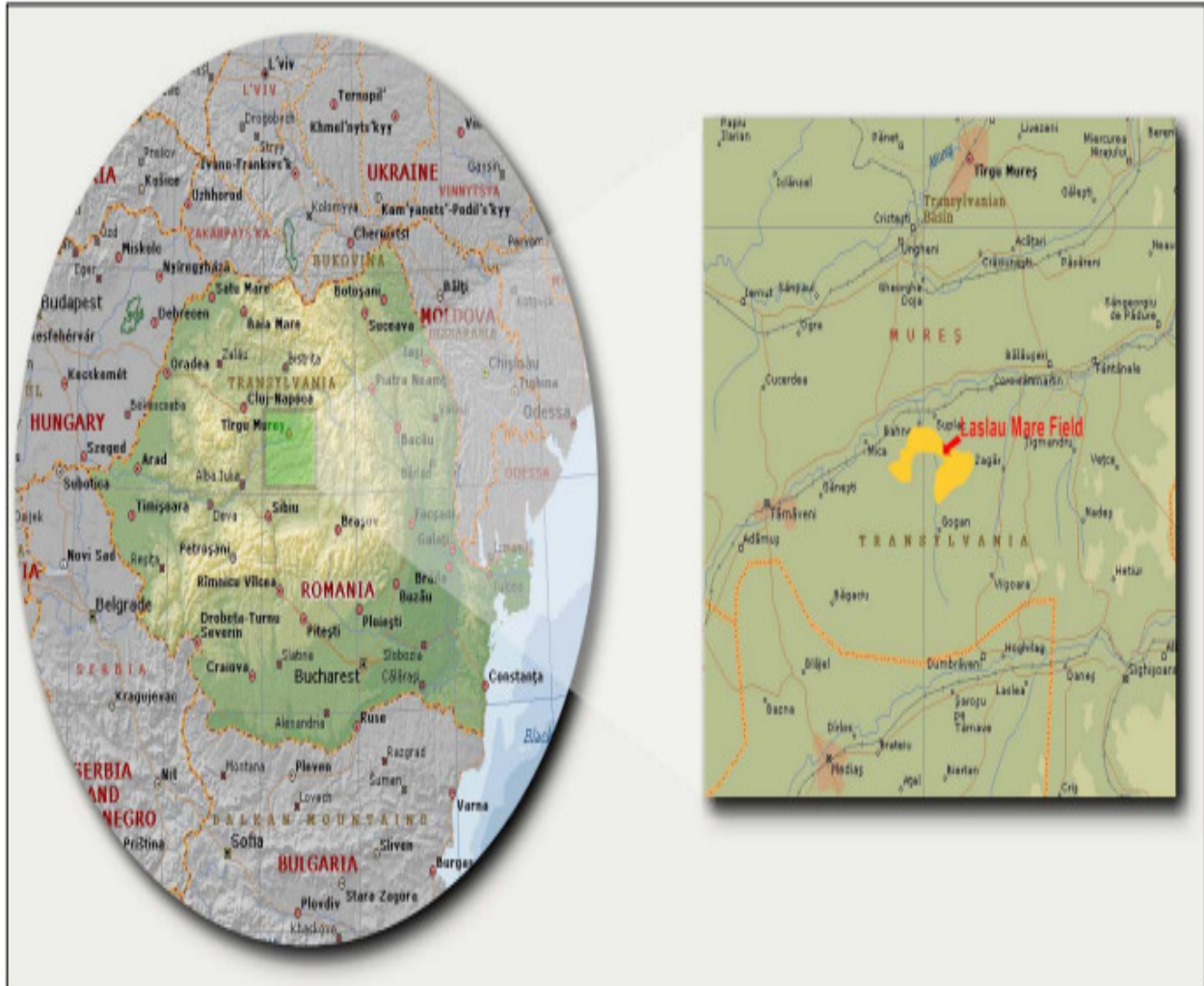


Figura 3.11. Laslău Mare – poziționarea geografică a zăcământului

Din punct de vedere sedimentologic, zăcămintele au fost depuse în ape adânci ce în timp geologic au devenit tot mai puțin adânci. Astfel, colectoarele întâlnite sunt de tip turbidite, canale de apă adâncă, canale de apă mai puțin adâncă.

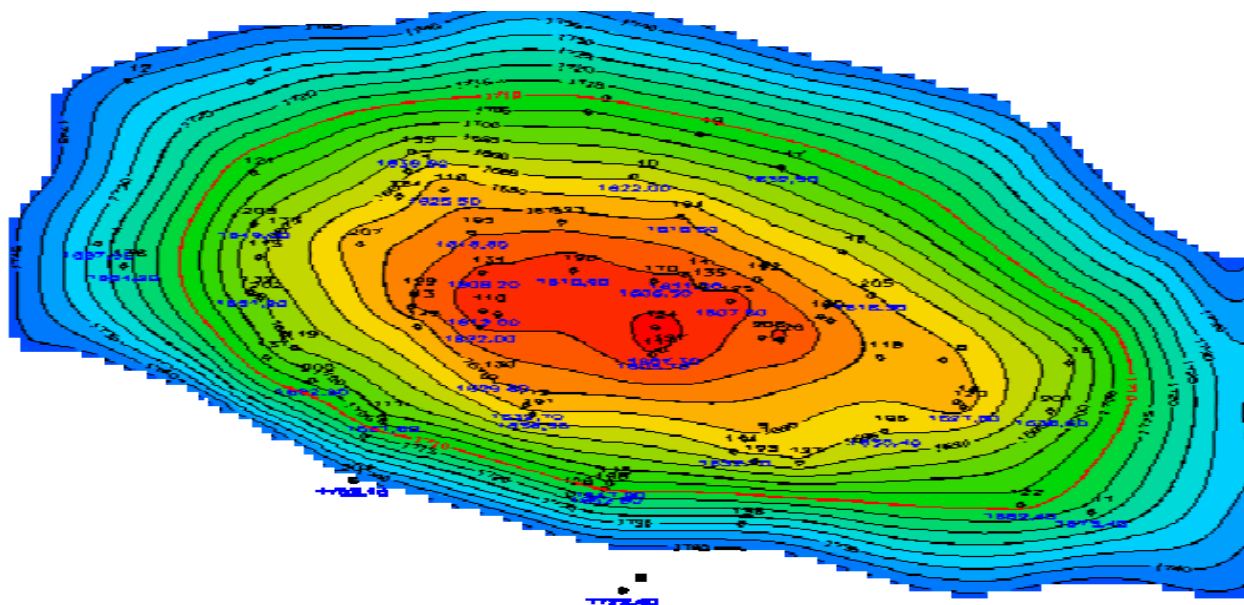


Figura 3.12. Laslău Mare – Hartă structurală la unul din obiectivele productive [23]

Zăcământul produce și în zilele noastre conform profilului de producție prezentat mai jos în Figura 3.13. Din motive de confidențialitate valorile debitelor reflectate pe axa ordonatorilor au fost eliminate, și, de asemenea, acest profil este prezentat numai până în anul 2015.

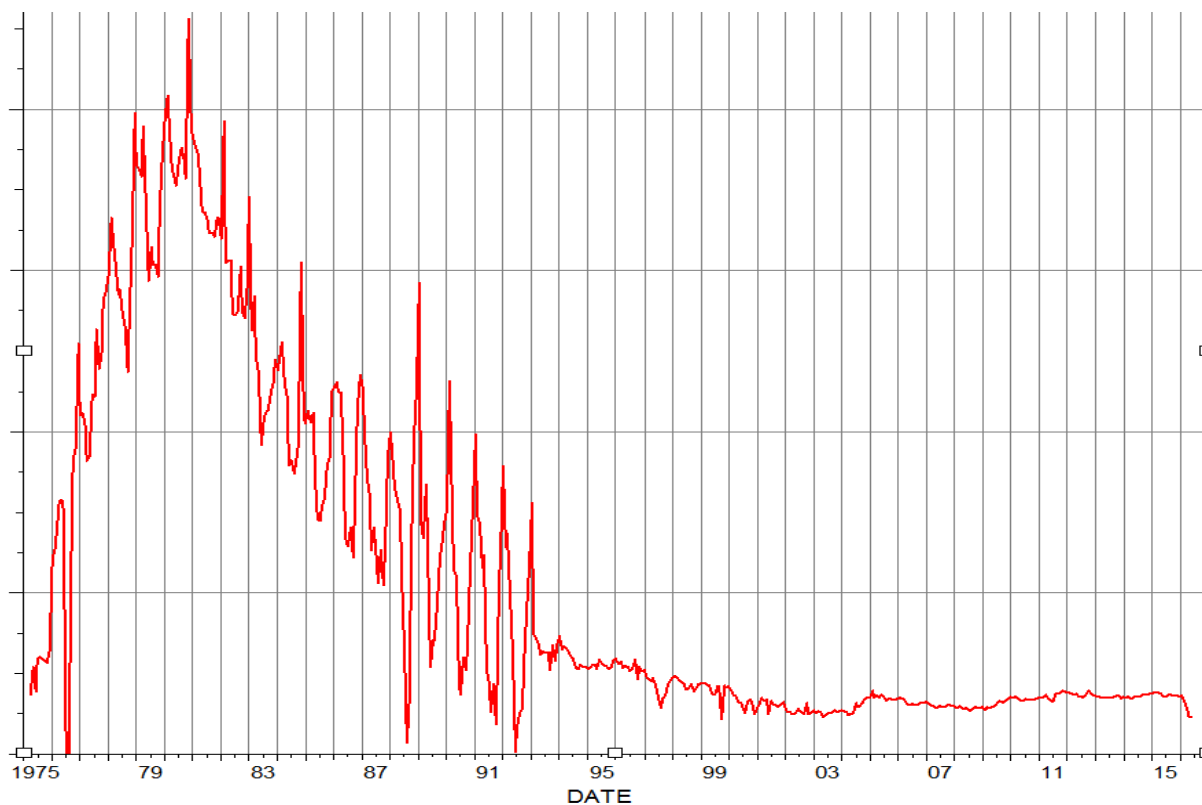


Figura 3.13. Laslău Mare - profilul de producție de la startul exploatării până în zilele noastre

Analizând Figura 3.13, până la jumătatea anilor 1990 se observă clar ciclicitatea producției în funcție de cererea sau consumul sezonier. Astfel, pe timp de vară, producția era redusă, iar pe timp de iarnă, în condițiile impuse de exploatare, producția era mai mare.

Din a doua jumătate a anilor 1990, această ciclicitate nu mai este așa evidentă pe motiv că au fost date în folosire depozite de înmagazinare subterană, iar supraproducția pe timp de vară era injectată acolo și produsă pe timp de iarnă.

3.2.2. Modelul de simulare și analiza rezultatelor

Gridul de simulare pentru Laslău Mare are forma unui anticlinal stratiform boltit, Figura 3., reieșită din interpretarea seismică și geologică.

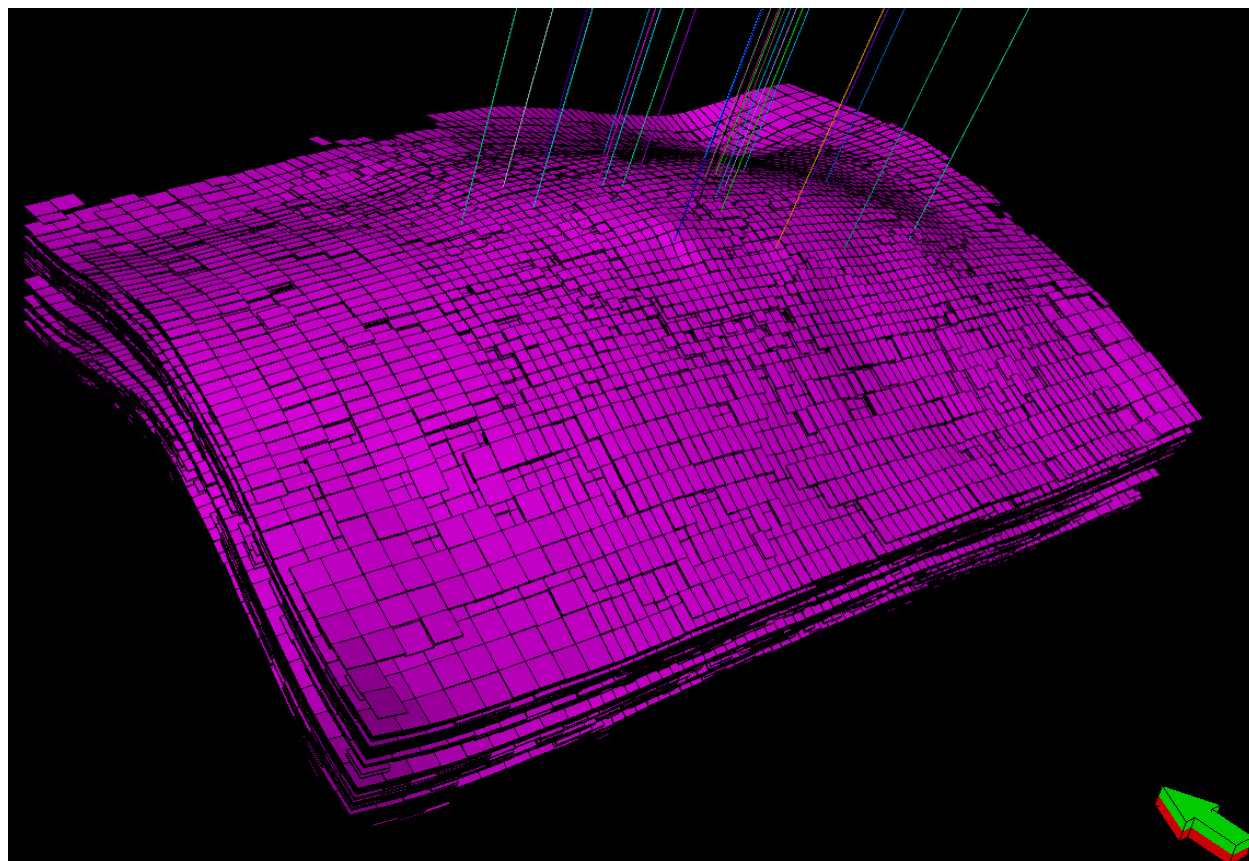


Figura 3.14. Gridul de simulare pentru zăcămintul Laslău Mare

Pentru prevederile de producție, vom rula două cazuri, un caz în care precipitarea nu este modelată și cazul în care precipitarea este modelată.

Când cele două debite vor avea comportamente diferite, vom ști că acea sondă va fi afectată de precipitarea sărurilor și va trebui să intervenim operațional pentru a îi remedia producția.

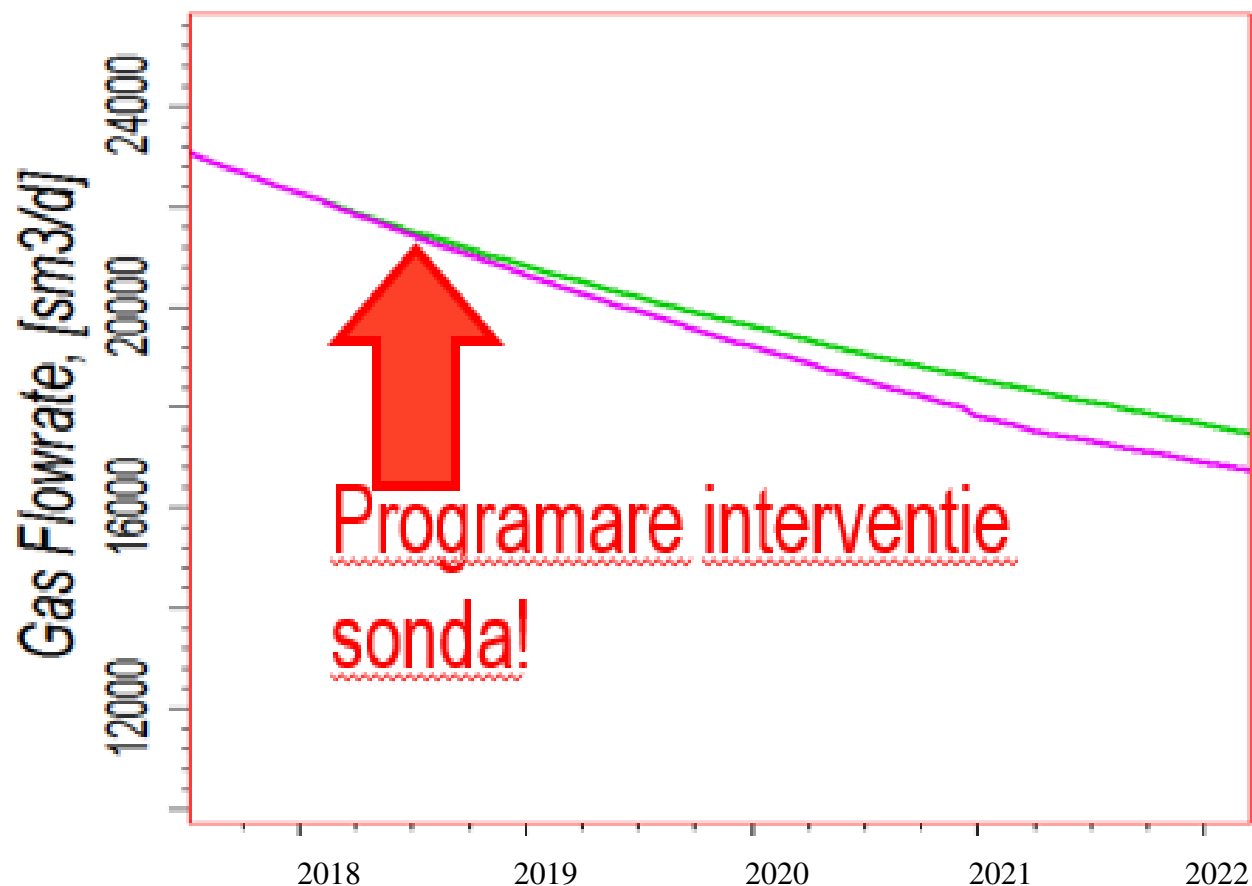


Figura 3.15. Comparație între debitele de curgere pentru cazurile cu sau fără precipitarea sării

În această situație, precum în Figura 3.15, una din sondele de pe structură a fost identificată ca având acest comportament și conform celor de mai sus va trebui intervenită.

Curba verde reprezintă debitul sondei reieșit din simularea fără precipitarea solidelor, iar curba mov pentru cazul în care solidele precipită.

Se observă că, undeva la jumătatea anului 2018, după ce sarea precipită, cele două curbe se separă.

Când se observa acest lucru, o intervenție la sondă este programată pentru a evita pierderea sondei și pentru a îi restabili productivitatea.

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Capacitatea de a livra proiecte viabile optimizate este o caracteristică de bază pentru orice companie operatoare a zăcămintelor de hidrocarburi. În funcție de disponibilitățile fiecărei companii aceste studii pot fi efectuate fie prin aplicarea unor metode analitice de calcul, fie prin metode numerice ce implică existența unor simulatoare de zăcământ.

Aceste două metodologii de livrare a studiilor de proiectare a exploatării zăcămintelor de hidrocarburi au fost prezentate analitic în capitolul 1 al acestei teze doctorale cu menționarea avantajelor și dezavantajelor fiecărei metode. În spiritul interesului pentru cercetare, dublăm prezentarea celor două metodologii cu realizarea unui studiu comparativ între cele două, studiu ce implică furnizarea unei comportări în exploatare pentru un același zăcământ prin cele două metode.

În acord cu obiectivul fundamental al tezei, ne-am focalizat în analiza noastră, asupra cazului zăcămintelor de gaze. În vederea obținerii unei soluții analitice, a fost prezentat modelul sintetizat de H. Asheim. În condițiile în care simplificările de mai sus sunt valide, soluția analitică va fi echivalentă celei reieșite din simularea numerică. În toate cazurile care implică zăcămintele fizice reale, acestea vor fi aproximări, făcând soluția analitică mai puțin perfectă decât cea numerică. Argumentul forte al soluțiilor analitice este acela că acestea oferă relații directe între presupunerile datelor de intrare, deciziile de producție și rezultatul profilelor de producție.

Totuși, având în vedere că zăcămintele descoperite sunt complexe din multe puncte de vedere, și având în vedere că forța de muncă a devenit specializată, iar efortul de calcul diminuat considerabil, în industria de hidrocarburi a momentului furnizarea studiilor de dezvoltare a exploatării zăcămintelor se realizează prin simulare numerică.

Având în vedere că una din provocările exploatării zăcămintelor de gaze este precipitarea sării în țevile de extracție, perforaturile sau în vecinătatea găurii de sondă, prezenta lucrare și-a propus să introducă această complexitate și să demonstreze, folosind simulatorul numeric ECLIPSE momentul în care sarea, $NaCl$, precipită. Acest fenomen are un impact important asupra producției sondelor, iar modelarea sa permite îmbunătățirea prevederilor de producție ale sondelor, implicit, îmbunătățirea studiilor de dezvoltare a exploatării zăcămintelor de hidrocarburi.

Curgerea gazelor sărace prin mediul poros vaporizează apa în vederea realizării echilibrului termodinamic în condițiile date de presiune, temperatură și pentru anumite salinități ale apei de

zăcământ. Vaporizarea apei în mediul poros poate conduce la precipitarea sării ce cauzează reducerea porozității efective și permeabilității absolute. Acest fenomen are loc către finalul de exploatare al unui zăcământ de gaze dar nu numai și poate conduce la diminuarea producției sondelor sau, chiar și la abandonarea acestora dacă nu se intervine în timp util.

Pentru a evita asemenea comportamente care implică pierderi de producție și pierderi financiare pentru operatorii acestor zăcăminte propunem, în lucrarea de față, o metodologie de anticipare prin simulare numerică aceste blocaje rezultate în urma precipitării sării pentru planificarea intervențiilor eficiente la sondă în timp util. Am gândit și proiectat această soluție, în următorii pași/algoritmi: generarea modelului static, crearea modelelor necesare simulării dinamice: modelul de fluide, modelele de permeabilități relative și presiuni capilare, rularea unei simulări la nivel de zăcământ și captarea condițiilor de curgere pe un perimetru definit în vecinătatea găurii de sondă acolo unde sarea poate precipita, prevederea modelului cu griduri locale rafinate în vederea observării fenomenelor de precipitare în vecinătatea sondelor, rularea simulării în sectorul ales mai sus și analizarea rezultatelor.

Pentru verificarea pe teren a eficienței acestei metodologii de anticipare, am aplicat algoritmul mai sus menționat, mai întâi pe un model sintetic simplu pentru a demonstra cu succes precipitarea sării cu ajutorul simulării numerice. Ulterior, algoritmul a fost aplicat cu succes pe un model de zăcământ real, Laslău Mare din Bazinul Transilvaniei. Am demonstrat astfel, impactul asupra productivității unei sonde precum și momentul în care precipită sarea, moment în care este de dorit a se interveni la sondă printr-o operație de spălare.

Într-o manieră sintetică de prezentare, contribuțiile personale și originale descrise pe larg și în context de-a lungul tezei, sunt enumerate mai jos, astfel:

- evidențierea fenomenului de precipitare a sării în vecinătatea sondelor de gaze, pentru prima dată în lume prin utilizarea simulatorului numeric ECLIPSE, acest lucru conferind valoare de inovativitate, studiului nostru;
- utilizarea unui model sintetic din literatura de specialitate pentru a demonstra similitudinea rezultatelor oferite de metodele analitică și simularea numerică în vederea prognozării comportamentului de producție al sondelor de gaze. S-a urmărit preluarea unui exemplu din literatura de specialitate și pentru a demonstra capacitatea doctorandului de a crea un model dinamic folosind soft-ul Petrel pentru simulatorul numeric ECLIPSE, implicit furnizarea

comportamentului de producție al sondelor folosind aceste mijloace moderne de lucru în industria de petrol și gaze;

- crearea unui experiment virtual folosind instrumentele Petrel și ECLIPSE pentru determinarea coeficienților de echilibru K_w pentru a modela trecerea componentilor, în principal a componentului H_2O , din faza gazoasă în faza lichidă pentru temperaturi și presiuni de zăcământ diverse. Acești coeficienți de echilibru sunt introduși în simulare cu ajutorul familiei de cuvinte cheie ECLIPSE *KWTABT*. Acest experiment virtual folosește funcționalitatea *CO2STORE* din ECLIPSE care este construită în baza lucrării “Peng-Robinson predictions for hydrocarbons, CO_2 , N_2 , and H_2S with pure water and *NaCl* brine” scrisă de Ingolf Soreide și Curtis H. Whitson. De asemenea, acest experiment virtual a fost pus în practică pentru prima dată în industrie în vederea definirii datelor necesare pentru simularea precipitării sării;

- realizarea unei metodologii pentru determinarea datelor de intrare necesare pentru fracțiile molare ale constituenților prezenți în apa mineralizată sau de zăcământ cu adâncimea. Aceste informații sunt introduse în ECLIPSE cu ajutorul cuvântului cheie *AMFVD*. Această metodologie folosește ca și dată de intrare principală salinitatea apei de zăcământ și presupune că singura sare dizolvată în apă de zăcământ este clorura de sodiu, *NaCl*. Așadar, constituenții apei de zăcământ sunt apa pură, H_2O , și sarea, *NaCl*;

- integrarea tuturor datelor de intrare într-un model sintetic în baza căruia este pusă în evidență precipitarea sării solide în urma tuturor fenomenelor și principiilor termodinamice prezentate în partea teoretică a prezentei lucrări de doctorat;

- implementarea metodologiei aplicată cu succes pe modelul sintetic pe un zăcământ real și identificarea momentului precipitării sării în vecinătatea sondei de gaze în vederea programării unei intervenții la sondă pentru a nu pierde această sondă a fost realizată pentru îmbunătățirea prevederilor de producție reieșite în urma unui studiu de simulare normal.

Pentru realizarea prezentei teze, a fost necesară evidențierea în baza studiului bibliografic a principalelor aspecte legate de: metode analitice de prevedere a comportării în exploatare a zăcămintelor de gaze, metode numerice de prevedere a comportării în exploatare a zăcămintelor de gaze, mecanismele precipitării sării în sondele de gaze.

BIBLIOGRAFIE

1. Asheim, H., *Analytical Solution of the Gas Production Profile*. U. Of Trondheim, SPE 17651, 1987.
2. Consentino, L., *Integrated Reservoir Studies*. Editions Technip, 2001.
3. Dake, L., *Fundamentals of Reservoir Engineering*. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, 1978.
4. Dietz, D.N., Scholten, P., Wilms, H., *Production Behavior of Prolific Gas Wells and Optimal Production Policy for a Complex Gas Reservoir*. J.P.T., vol. 35, no. 13, pg. 2285, Dec. 1983.
5. Dumitrache, L.,N., Nistor, I., Suditu, S., Badea, A., M., *Determining Water-Vapor Phase Equilibrium Coefficients at Different Temperatures*. Revista de Chimie, Vol. 71, Nr. 11, (în curs de publicare), Noiembrie, 2017.
6. Dumitrache, L.,N., Nistor, I., Suditu, S., Badea, A., M., *Simulating salt precipitation in dry gas reservoirs using ECLIPSE Thermal CO2STORE*. Revista de Chimie, Vol. 72, Nr. 12, , (în curs de publicare), Decembrie, 2017.
7. Dumitrache, L.,N., Nistor, I., Suditu, S., Mureșan, B., *Defining free water level, gas water contacts, and reporting hydrocarbon volumes*. În: Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești Technical Series, No.2/2017.
8. Dumitrache, L.,N., Nistor, I., Suditu, S., Badea, A., M., *Permeability and Pore Volume Variations with Reservoir Pressures*. În: Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești Technical Series, No.1/2017.
9. Dumitrache, L.,N., Nistor, I., Suditu, S., Badea, A., M., *Using an Integrated Asset Model to Prove Feasibility of Installing a Field Compressor for Mature Dry Gas Reservoirs*. În: Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești Technical Series, No.3/2016.
10. ECLIPSE Reference Manual 2012.2.
11. ECLIPSE Technical Description 2012.2.
12. Energy Resources Conservation Board, *Gas Well Testing*, Energy Resources Building, 640 Sixth Av. SW, Calgary Alberta, Canada, 1979.
13. Forchheimer, P., *Wasserbevegung Durch Boden*, Z. Ver. Deutsch. Ing. 45, pg. 1781, 1901.
14. Gewers, C.W.W., Nichol, L.R., *Gas Turbulence Factor in a Microvulgar Carbonate*. Journal of Can. Petr. Tech., pg. 51, 1969.

15. Kleinitz, W., Koelher, M. and Dietzsch, G. *The Precipitation of Salt in Gas Production Wells*. SPE 68953, prepared for SPE European Formation Damage Conference – The Hague, the Netherlands, May 2009.
16. Le, D. and Mahadevan, J.: *Productivity loss in gas Wells Due to Salt Deposition*. SPE 132606, prepared for SPE Western Regional Meeting – Anaheim, USA, May 2010.
17. Nistor, I., - "*Curs de Tratarea Apei*", Note de curs – Facultatea de Ingineria Petrolului și a Gazelor, Specializarea Transportul, Distribuția și Depozitarea Hidrocarburilor, Anul V
18. Place, M.C. and Smith, J.T. *An Unusual Case of Salt plugging in a High-Pressure Sour Gas Well*. SPE 13246, presented at the 59th Annual Technical Conference and Exhibition – Houston, USA, September 1984.
19. Rawlins, E.L., Schellhardt, M.A. *Backpressure Data on Natural Gas Wells and Their Application to Production Practices*. U.S. Bureau of Mines Monograph 7, 1936.
20. Smith, R.V., *Determining Friction Factors and Measuring Productivity of Gas Wells*, Trans. AIME, 189. pg. 73, 1950.
21. Soreide, I. and Whitson, C.H. *Peng-Robinson predictions for hydrocarbons, CO₂, N₂, and H₂S with pure water and NaCl brine*. Fluid Phase Equilibria, 77(1992) 217-240, Elsevier Science Publishers B.V. – Amsterdam, The Netherlands, 1992.
22. Stoicescu, M., - "*Curs de Simulatoare Numerice*", Note de curs – MIZ, An I
23. Ștefănescu D. P., Serrano G., Stolk W. *Applying new technology to optimize mature oil and gas fields*. prepared for SPE Europec/EAGE Annual Conference held in Madrid, Spain, 13-16 June 2005,
24. Standing M.B., Katz D.L., *Density of Natural Gases*. Trans. AIME, 146, pg. 140, 1942.
25. Van Dorp, Q.T., Slijkhuis, M. and Zitha, P.L.J. *Salt Precipitation in Gas Reservoirs*. SPE 122140, prepared for 2009 SPE European Formation damage Conference – Scheveningen, The Netherlands, May 2009.