



(12)

CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2016 00323**

(22) Data de depozit: **06/11/2014**

(30) Prioritate:

06/11/2013 US 61/900, 479

(41) Data publicării cererii:

29/11/2016 BOPI nr. **11/2016**

(86) Cerere internațională PCT:

Nr. US 2014/064205 06/11/2014

(87) Publicare internațională:

Nr. WO 2015/069817 14/05/2015

(71) Solicitant:

**• SCHLUMBERGER TECHNOLOGY B.V.,
PARKSTRAAT 83-89, THE HAGUE, NL**

(72) Inventatori:

**• WENG XIAOWEI, 10019 TERRANCE
SPRINGS LANE, KATY, TEXAS, US;
• KRESSE OLGA, 15270 VOSS ROAD, 937,
SUGAR LAND, TEXAS, US**

(74) Mandatar:

**ROMINVENT S.A.,
STR. ERMIL PANGRATTI NR.35,
SECTOR 1, BUCUREȘTI**

(54) MODELAREA INTERACȚIUNILOR DE FRACTURARE HIDRAULICĂ ÎN REȚELELE DE FRACTURARE COMPLEXE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o metodă pentru realizarea unei operații de fracturare într-o locație a unui puț cu o rețea de fracturi, implicând obținerea datelor despre locația puțului, și a unui model de pământ mecanic, și generarea unui model de dezvoltare a fracturilor hidraulice pentru rețeaua de fracturi în timp, în care generarea implică extinderea fracturilor hidraulice într-o gaură de puț și în interiorul rețelei de fracturi a unei formațiuni subterane, pentru a forma o rețea de fracturi hidraulice, determinarea parametrilor fracturilor hidraulice după extindere, determinarea parametrilor de transport pentru agentul de susținere ce trece prin rețeaua de fracturi hidraulice, și determinarea dimensiunilor fracturilor hidraulice din parametrii fracturilor hidraulice, parametrii de transport și modelul de pământ mecanic, metoda implicând, de asemenea, și realizarea urmăririi eforturilor pe fracturile hidraulice, pentru a determina interferența de eforturi între fracturile hidraulice la diferite adâncimi și repetarea generării pe baza interferenței de eforturi determinate. Metoda poate implica și determinarea comportamentului de intersectare.

Revendicări: 24

Figuri: 21

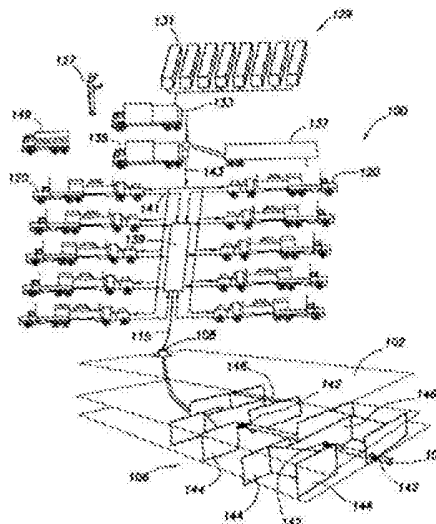
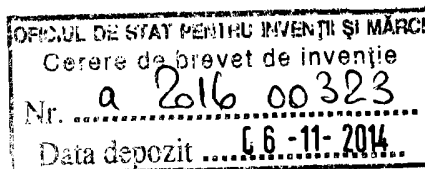


Fig. 1





282

MODELAREA INTERACȚIUNII FRACTURILOR HIDRAULICE ÎN REȚELE DE FRACTURARE COMPLEXA

Descriere

[1] Această cerere de brevet revendică prioritatea Cererii Provizorii US Nr. 61/900479 înregistrată la 6 noiembrie 2013, al cărei întreg conținut este incorporat aici prin citare. Această cerere de brevet este o continuare în parte a cererii de brevet US Nr. 11/356369 înregistrată la 2 noiembrie 2012, al cărei întreg conținut este incorporat aici prin citare.

[2] Prezenta invenție se referă în general la metode și sisteme pentru realizarea operațiilor în locații de puț. Mai precis, această invenție este îndreptată către metode și sisteme pentru realizarea operațiunilor de fracturare, cum ar fi investigarea formațiunilor subterane și caracterizarea rețelelor de fracturi hidraulice dintr-o formațiune subterană.

[3] În vederea facilitării recuperării hidrocarburilor din puțurile de petrol și gaz, formațiunile subterane care înconjoară aceste puțuri pot fi fracturate hidraulic. Fracturarea hidraulică poate fi utilizată pentru a crea fisuri în formațiunile subterane pentru a permite petrolului și gazului să se deplaseze către puț. O formațiune este fracturată prin introducerea unui fluid proiectat special (denumit „fluid de fracturare” sau „suspensie de fracturare” în cadrul de față) la o presiune ridicată și debite de curgere ridicate în interiorul formațiunii prin una sau mai multe găuri de foraj. Fracturile hidraulice se pot extinde față de gaura de foraj la sute de picioare în două direcții opuse conform eforturilor naturale din interiorul formațiunii. În anumite circumstanțe, acestea pot forma o rețea de fracturi complexe. Rețelele de fracturi complexe pot include fracturi hidraulice induse și fracturi naturale, care se pot intersecta sau nu, de-a lungul mai multor azimuturi, în mai multe planuri și direcții și în mai multe regiuri.

[4] Metodele și sistemele curente de monitorizare a fracturilor hidraulice pot mapa locațiile unde apar fracturi și mărimea fracturilor. Unele metode și sisteme de monitorizare micro-seismică pot procesa locațiile evenimentelor seismice prin maparea timpilor de sosire seismici și polarizarea informațiilor în spațiul tridimensional prin utilizarea timpilor de deplasare și/sau traseelor razelor modelate. Aceste metode și sisteme pot fi utilizate pentru a deduce propagarea în timp a fracturilor hidraulice.

[5] Modelele de fracturi hidraulice create prin stimularea fracturării pot fi complexe și pot forma o rețea de fracturi, așa cum a fost indicat, printr-o distribuție de evenimente

Teodora

micro-seismice asociate. Rețele complexe de fracturi hidraulice au fost dezvoltate pentru a reprezenta fracturile hidraulice create. Exemple de modele de fracturi sunt prevăzute în brevetele/cererile de brevet US 6101447, 7363162, 7788074, 20080133186, 20100138196 și 20100250215.

[6] În cel puțin un aspect, prezenta invenție se referă la metode de realizare a unei operațiuni de fracturare într-o locație de puț. Locația de puț este poziționată în jurul unei formațiuni subterane având o gaură de foraj prin ea și o rețea de fracturi în aceasta. Rețeaua de fracturi are fracturi naturale în aceasta. Locația de puț poate fi stimulată prin injectarea unui fluid de injectare cu agent de susținere în interiorul rețelei de fracturi. Metodele implică obținerea datelor despre locația de puț cuprinzând parametrii fracturilor naturale și obținerea unui model de pământ mecanic al formațiunii subterane și generarea unui model de dezvoltare a fracturilor hidraulice pentru rețeaua de fracturi în timp. Generarea implică extinderea fracturilor hidraulice din gaura de foraj și în interiorul rețelei de fracturi a formațiunii subterane pentru a forma o rețea de fracturi hidraulice incluzând fracturile naturale și fracturile hidraulice, determinarea parametrilor fracturilor hidraulice după extindere, determinarea parametrilor de transport pentru agentul de susținere ce trece prin rețeaua de fracturi hidraulice, și determinarea dimensiunilor fracturilor hidraulice din parametrii determinați ai fracturilor hidraulice, parametrii de transport determinați și modelul de pământ mecanic. Metoda implică de asemenea realizarea urmăririi eforturilor pe fracturile hidraulice pentru a determina interferența de eforturi între fracturile hidraulice la diferite adâncimi, realizarea unei urmăriri suplimentare a eforturilor pe fracturile hidraulice pentru a determina interferența eforturilor între fracturile hidraulice la diferite adâncimi, și repetarea generării pe baza interferenței de eforturi determinată. Metoda poate include de asemenea analizarea interferenței eforturilor între fracturile hidraulice pentru a evalua dezvoltarea înălțimii fiecărei fracturi.

[7] Realizarea urmăririi eforturilor poate implica realizarea unei prime urmăriri a eforturilor pentru a determina interferența între fracturile hidraulice și/sau realizarea unei a doua urmăriri pentru a determina interferența între fracturile hidraulice la diferite adâncimi. Realizarea urmăririi eforturilor poate implica realizarea unei metode de discontinuitate a deplasării bidimensionale și/sau realizarea unei metode de discontinuitate a deplasării tridimensionale.



[8] Dacă fractura hidrolică întâlnește o fractură naturală, metoda poate implica de asemenea determinarea comportamentului de intersectare între fracturile hidrolice și o fractură întâlnită pe baza interferenței eforturilor determinată, și repetarea poate implica repetarea generării pe baza interferenței de eforturi determinată și a comportamentului de intersectare. Metoda poate implica de asemenea stimularea locației de puț prin injectarea unui fluid de injectare cu agent de susținere în rețeaua de fracturi.

[9] Metoda poate implica de asemenea, dacă fractura hidrolică întâlnește o fractură naturală, determinarea comportamentului de intersectare la fractura naturală întâlnită, și în care repetarea cuprinde repetarea generării pe baza interferenței de eforturi determinată și a comportamentului de intersectare. Modelul de dezvoltare a fracturilor hidrolice poate fi influențat sau neinfluențat de comportamentul de intersectare. O presiune a fracturilor din rețeaua de fracturi hidrolice poate fi mai mare decât un efort ce acționează asupra fracturii întâlnite, și modelul de dezvoltare a fracturilor se poate propaga de-a lungul fracturii întâlnite. Modelul de dezvoltare a fracturilor poate continua să se propage de-a lungul fracturii întâlnite până când este atins un capăt al fracturii naturale. Modelul de dezvoltare a fracturilor își poate modifica direcția la capătul fracturii naturale, și modelul de dezvoltare a fracturilor se poate extinde într-o direcție normală pe un efort minim la capătul fracturii naturale. Modelul de dezvoltare a fracturilor se poate propaga normal pe un efort principal local conform urmăririi eforturilor.

[10] Urmărirea eforturilor poate implica realizarea discontinuității deplasării pentru fiecare din fracturile hidrolice. Urmărirea eforturilor poate implica realizarea urmăririi eforturilor în jurul mai multor găuri de foraj dintr-o locație de puț și repetarea generării utilizând urmărirea eforturilor realizată pe multiplele găuri de foraj. Urmărirea eforturilor poate implica realizarea urmăririi eforturilor în mai multe etape de simulare în gaura de foraj.

[11] Metoda poate implica de asemenea validarea modelului de dezvoltare a fracturilor. Validarea poate implica compararea modelului de dezvoltare a fracturilor cu cel puțin o simulare de stimulare a rețelei de fracturi. Metoda poate implica de asemenea ajustarea stimulării (de exemplu, rata de pompare și/sau viscozitatea fluidului) pe baza urmăririi eforturilor.

[12] Extinderea poate implica extinderea fracturilor hidraulice de-a lungul unui model de dezvoltare a fracturilor pe baza parametrilor fracturilor naturale și un efort minim și un efort maxim pe formațiunea subterană. Determinarea dimensiunilor fracturilor poate include una dintre evaluarea măsurătorilor seismice, urmărirea furnicilor, măsurători sonice, măsurători geologice și combinații ale acestora. Datele despre locația de puț pot include cel puțin una din măsurători geologice, geofizice, geomecanice, diagrame, extindere, istoric și combinații ale acestora. Parametrii fracturilor naturale pot fi generați de una din observarea diagramei ce formează imaginea găurii de foraj, estimarea dimensiunilor fracturilor din măsurătorile găurii de foraj, obținerea imaginilor microseismice și combinații ale acestora.

[13] Exemplele de realizare a sistemului și metodei pentru caracterizarea eforturilor în gaura de foraj sunt descrise cu referire la următoarele figuri. Aceleași numere de referință sunt utilizate pe parcursul figurilor pentru a desemna aceleași caracteristici și componente.

[14] Fig. 1.1 este o ilustrare schematică a unei locații de fracturare hidraulică ilustrând o operație de fracturare;

[15] Fig. 1.2 este o ilustrare schematică a unei locații de fracturare hidraulică cu evenimente micro-seismice ilustrate pe aceasta;

[16] Fig. 2 este o ilustrare schematică a unei fracturi 2D;

[17] Fig. 3.1 și 3.2 sunt ilustrări schematice ale unui efect de urmărire a eforturilor;

[18] Fig. 4 este o ilustrare schematică comparând 2D DDM și Flac3D pentru două fracturi drepte paralele;

[19] Fig. 5.1-5.3 sunt grafice ilustrând 2D DDM și Flac3D ale fracturilor extinse pentru eforturi în diverse poziții;

[20] Fig. 6.1-6.2 sunt grafice ilustrând trasee de propagare pentru două fracturi inițial paralele în câmpuri de eforturi izotrop și respectiv anizotrop;

[21] Fig. 7.1-7.2 sunt grafice ilustrând trasee de propagare pentru două fracturi inițial decalate în câmpuri de eforturi izotrop și respectiv anizotrop;

[22] Fig. 8 este o ilustrare schematică a fracturilor paralele transversale de-a lungul unui puț orizontal;

[23] Fig. 9 este un grafic ilustrând lungimi pentru cinci fracturi paralele;

[24] Fig. 10 este o diagramă schematică ilustrând geometria fracturilor UFM și lățimea pentru fracturile paralele din Figura 9;

[25] Fig. 11.1-11.2 sunt diagrame schematice ilustrând geometria fracturilor pentru un caz cu fricțiune cu perforare ridicată și respectiv un caz de distanțare a fracturilor mari;

[26] Fig. 12 este un grafic ilustrând maparea microseismică;

[27] Fig. 13.1-13.4 sunt diagrame schematice ilustrând o rețea de fracturi simulată comparativ cu măsurătorile microseismice respectiv pentru etapele 1-4;

[28] Fig. 14.1-14.4 sunt diagrame schematice ilustrând o rețea de fracturi distribuite în diverse etape;

[29] Fig. 15 este o schemă bloc ilustrând o metodă de realizare a unei operații de fracturare; și

[30] Fig. 16.1-16.4 sunt ilustrări schematice prezentând dezvoltarea fracturilor în jurul unei găuri de foraj în timpul unei operații de fracturare.

[31] Fig. 17 este o diagramă schematică prezentând un sistem de coordonate atașat la un element DDM 3D dreptunghiular.

[32] Fig. 18-20 sunt diagrame schematice prezentând două fracturi verticale la adâncimi diferite și afectarea creșterii înălțimii fiecărei fracturi datorită urmăririi eforturilor.

[33] Fig. 21 este o schemă bloc ilustrând o altă metodă de realizare a unei operații de fracturare.

[34] Descrierea care urmează include aparate, metode, tehnici și secvențe de instrucțiuni exemplificative care implementează tehnicile conform obiectului invenției. Totuși, este înțeles că exemplele de realizare descrise pot fi implementate fără aceste detalii specifice.

[35] Au fost dezvoltate modele pentru a înțelege rețelele de fracturare din subteran. Modelele pot lua în considerare diverși factori și/sau date, însă nu pot fi constrânse prin luarea în considerare a cantității de fluid pompat sau a interacțiunilor mecanice dintre fracturi și fluidul injectat și dintre fracturi. Modele limitate pot fi furnizate pentru a oferi o înțelegere fundamentală a mecanismelor implicate, însă pot fi complexe în ceea ce privește descrierea matematică și/sau pot necesita resurse de procesare pe calculator și timp în vederea asigurării simulărilor precise ale propagării fracturilor

hidraulice. Un model limitat poate fi configurat să realizeze simulări pentru a lua în considerare factori cum ar fi interacțiunea între fracturi, în timp și în condițiile dorite.

[36] Un model de fractură neconvențional (UFM) (sau model complex) poate fi utilizat pentru a simula propagarea complexă a rețelei de fracturi într-o formațiune cu fracturi naturale pre-existente. Multiple ramuri de fracturi se pot propaga simultan și intersecta/încruși unele cu altele. Fiecare fractură deschisă poate exercita eforturi suplimentare pe roca înconjurătoare și fracturile adiacente, care poate fi denumit drept efectul de „urmărire a eforturilor”. Urmărirea eforturilor poate cauza o restricție a parametrilor fracturilor (de exemplu, lățimea), care poate conduce, spre exemplu, la un risc mai mare de filtrare a agentului de susținere. Urmărirea eforturilor poate modifica de asemenea traseul de propagare al fracturilor și poate afecta modelele de rețele de fracturi. Urmărirea eforturilor poate afecta modelarea interacțiunilor fracturilor într-un model de fracturi complex.

[37] Este prezentată o metodă de calculare a urmăririi eforturilor într-o rețea complexă de fracturi hidraulice. Metoda poate fi realizată pe baza unei Metode de Discontinuitate a Deplasării 2D (2D DDM) cu corecție pentru înălțimea finită a fracturilor sau Metoda de Discontinuitate a Deplasării 3D (3D DDM). Câmpul de eforturi calculat din 2D DDM poate fi comparat cu simularea numerică 3D (3D DDM sau flac3D) pentru a determina o aproximare pentru problema fracturilor 3D. Această calculație a efectului de urmărire a eforturilor poate fi incorporată în UFM. Rezultatul pentru cazurile simple de două fracturi arată că fracturile se pot atrage sau respinge una pe alta în funcție de, spre exemplu, pozițiile lor relative inițiale și poate fi comparat cu un model de fractură hidraulică non-plan 2D independent. Efectul de urmărire a eforturilor poate fi asigurat, de asemenea, utilizând spre exemplu 3D DDM pentru a lua în considerare interacțiunea fracturilor la diferite adâncimi.

[38] Sunt prezentate de asemenea exemple suplimentare de propagare plană și complexă a fracturilor din multiple grupuri de perforații, prezentând faptul că interacțiunea fracturilor poate controla dimensiunea fracturilor și modelul de propagare. Într-o formațiune cu anizotropie redusă a eforturilor, interacțiunea fracturilor poate conduce la divergența dramatică a fracturilor deoarece acestea pot tinde să se respingă unele pe altele. Totuși, chiar și atunci când anizotropia eforturilor este mare și întoarcerea fracturilor datorită interacțiunilor fracturilor este limitată, efectul de urmărire a

eforturilor poate avea un efect asupra lăţimii fracturilor, care poate afecta distribuţia ratei de injectare în multiplele grupuri de perforaţii, şi astfel geometria de ansamblu a reţelei de fracturi şi plasarea agentului de susţinere.

[39] Figurile 1.1 şi 1.2 ilustrează propagarea fracturilor în jurul unei locaţii de puţ 100. Locaţia de puţ are o gaură de foraj 104 ce se extinde dintr-o gură de puţ 108 într-o locaţie de suprafaţă şi printr-o formaţiune subterană 102 de dedesubt. O reţea de fracturi 106 se extinde în jurul găurii de foraj 104. Un sistem de pompare 129 este poziţionat în jurul capului de puţ 108 pentru trecerea fluidului prin tubingul 142.

[40] Sistemul de pompare 129 este ilustrat ca fiind acţionat de un operator din teren 127 pentru înregistrarea datelor de întreţinere şi operaţionale şi/sau realizarea operaţiunii în conformitate cu un program de pompare prescris. Sistemul de pompare 129 pompează de la suprafaţă în gaura de foraj 104 în timpul operaţiei de fracturare.

[41] Sistemul de pompare 129 poate include o sursă de apă, cum ar fi o multitudine de rezervoare cu apă 131, care alimentează apă la o unitate de hidratare gel 133. Unitatea de hidratare gel 133 combină apa din rezervoarele 131 cu un agent de gelifiere pentru a forma un gel. Gelul este trimis apoi la un amestecător 135 în care acesta este amestecat cu un agent de susţinere de la un mijloc de transport a agentului de susţinere 137 pentru a forma un fluid de fracturare. Agentul de gelifiere poate fi utilizat pentru a creşte viscozitatea fluidului de fracturare, şi pentru a permite agentului de susţinere să fie suspendat în fluidul de fracturare. Acesta poate acţiona de asemenea ca un agent de reducere a frecării pentru a permite rate de pompare mai mari cu mai puţină presiune de frecare.

[42] Fluidul de fracturare este apoi pompat din amestecătorul 135 la camioanele de tratament 120 cu pompele cu piston, aşa cum este prezentat prin liniile continue 143. Fiecare camion de tratament 120 primeşte fluidul de fracturare la o presiune scăzută şi îl descarcă într-un colector comun 139 (denumit uneori remorcă proiectil sau proiectil) la o presiune ridicată, aşa cum este prezentat cu liniile întrerupte 141. Proiectilul 139 direcţionează apoi fluidul de fracturare din camioanele de tratament 120 la gaura de foraj 104, aşa cum este prezentat prin linia continuă 115. Unul sau mai multe camioane de tratament 120 pot fi utilizate pentru alimentarea fluidului de fracturare la un debit dorit.

[43] Fiecare camion 120 poate fi acționat în mod normal la orice debit, cum ar fi mult sub capacitatea sa maximă de operare. Acționarea camioanelor de tratament 120 la capacitatea lor de operare poate permite unuia să cedeze, iar restul să funcționeze la o viteză mai mare pentru a compensa absența pompei defecte. Un sistem de comandă computerizat 149 poate fi utilizat pentru a dirija întregul sistem de pompare 129 în timpul operației de fracturare.

[44] Diverse fluide, cum ar fi fluide de stimulare convenționale cu agenți de susținere, pot fi utilizate pentru a crea fracturi. Alte fluide, cum ar fi geluri vâscoase, „apă lunecoasă” (care poate avea un agent de reducere a frecării (polimer) și apă) pot fi utilizate de asemenea pentru fracturarea hidrolică a puțurilor de șisturi bituminoase. Această „apă lunecoasă” poate fi sub forma unui fluid subțire (de exemplu, aproape cu aceeași viscozitate ca apa) și poate fi utilizată pentru a crea fracturi mai complexe, cum ar fi multiple fracturi micro-seismice detectabile prin monitorizare.

[45] Așa cum de asemenea este prezentat în Figurile 1.1 și 1.2, rețeaua de fracturi include fracturi situate în diverse poziții în jurul găurii de foraj 104. Diversele fracturi pot fi fracturi naturale 144 prezente înainte de injectarea fluidelor, sau fracturi hidrolice 146 generate în jurul formațiunii 102 în timpul injectării. Figura 1.2 prezintă o ilustrare a rețelei de fracturi 106 bazate pe evenimentele seismice 148 obținută utilizând mijloace convenționale.

[46] Stimularea multi-etape poate fi standardul pentru dezvoltarea rezervorului neconvențional. Totuși, un obstacol pentru optimizarea extinderilor în rezervoarele de șisturi bituminoase poate implica o lipsă a modelelor de fracturi hidrolice care pot simula adecvat propagarea fracturilor complexe adesea observate în aceste formațiuni. A fost dezvoltat un model complex de rețea de fracturi (sau UFM) (vezi, de exemplu, *Weng, X., Kresse, O., Wu, R., și Gu, H., Modeling of Hydraulic Fracture Propagation in a Naturally Fractured Formation. Paper SPE 140253 prezentat la SPE Hydraulic Fracturing Conference and Exhibition, Woodlands, Texas, USA, ianuarie 24-26 (2011)* (în cele ce urmează “Weng 2011”); *Kresse, O., Cohen, C., Weng, X., Wu, R., și Gu, H. 2011* (în cele ce urmează “Kresse 2011”). *Numerical Modeling of Hydraulic Fracturing in Naturally Fractured Formations. 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, iunie 26-29*, al căror întreg conținut este incorporate aici).

[47] Modelele existente pot fi utilizate pentru a simula propagarea fracturilor, deformarea rocilor și curgerea fluidului în rețeaua de fracturi complexe creată în timpul unui tratament. Modelul poate fi utilizat de asemenea pentru a rezolva problema complet legată a curgerii fluidului în rețeaua de fracturi și deformarea elastică a fracturilor, care poate avea prezumții și ecuații de guvernare similare cu modelele de fracturare pseudo-3D convenționale. Ecuații de transport pot fi rezolvate pentru fiecare component al fluidelor și agenții de susținere pompați.

[48] Modelele de fracturi plane convenționale pot modela diverse aspecte ale rețelei de fracturi. Modelul UFM prevăzut poate implica de asemenea abilitatea de simula interacțiunea fracturilor hidraulice cu fracturile naturale pre-existente, și anume determinarea dacă o fractură hidraulică se propagă prin sau este oprită de o fractură naturală când acestea se intersectează și ulterior se propagă de-a lungul fracturii naturale. Ramificarea fracturii hidraulice la intersecția cu fractura naturală poate da naștere la dezvoltarea unei rețele de fracturi complexe.

[49] Un model de intersecție poate fi extins din criteriul de intersecție de interfață al lui Renshaw și Pollard (vezi, de exemplu, *Renshaw, C. E. și Pollard, D. D. 1995, An Experimentally Verified Criterion for Propagation across Unbounded Frictional Interfaces in Brittle, Linear Elastic Materials. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 32: 237-249 (1995)* al cărei întreg conținutul este incorporate aici), destinat a fi aplicat la orice unghi de intersecție, și poate fi dezvoltat (vezi, de exemplu, *Gu, H. și Weng, X. Criterion for Fracturas Crossing Frictional Interfaces at Non-orthogonal Angles. 44th US Rock symposium, Salt Lake City, Utah, iunie 27-30, 2010* (în cele ce urmează "Gu și Weng 2010"), al cărei întreg conținut este incorporat aici prin citare) și validat pe baza datelor experimentale (vezi, de exemplu, *Gu, H., Weng, X., Lund, J., Mack, M., Ganguly, U. și Suarez-Rivera R. 2011. Hydraulic Fractura Crossing Natural Fractura at Non-Orthogonal Angles, A Criterion, Its Validation and Applications. Paper SPE 139984 prezentat la SPE Hydraulic Fracturing Conference and Exhibition, Woodlands, Texas, ianuarie 24-26 (2011)* (în cele ce urmează "Gu și alții 2011"), al cărei întreg conținut este incorporat aici prin citare), și integrat în UFM.

[50] Pentru a simula adecvat propagarea fracturilor multiple sau complexe, modelul de fracturi poate ține cont de o interacțiune între ramurile adiacente ale fracturilor hidraulice, denumite adesea drept efectul de „urmărire a eforturilor”. Când o

singură fractură hidrolică plană este deschisă sub o presiune netă de fluid finită, aceasta poate exercita un câmp de eforturi asupra rocii înconjurătoare care este proporțional cu presiunea netă.

[51] În cazul limitativ al unei fracturi verticale infinit de lungă cu o înălțime finită constantă, poate fi prevăzută o expresie analitică a câmpului de eforturi exercitat de fractura deschisă. Vezi, de exemplu, *Warpinski, N.F. și Teufel, L.W., Influence of Geologic Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation, JPT, Feb., 209-220 (1987)* (în cele ce urmează "Warpinski și Teufel") și *Warpinski, N.R., și Branagan, P.T., Altered-Stress Fracturing. SPE JPT, Septembrie, 1989, 990-997 (1989)*, al căror întreg conținut este incorporate aici prin citare. Presiunea netă (sau mai precis, presiunea care produce deschiderea fracturii date) poate exercita un efort de compresie în direcția normală pe fractură peste efortul minim *in-situ*, care poate fi egal cu presiunea netă de pe fața fracturii, însă scade rapid odată cu distanța față de fractură.

[52] La o distanță peste o înălțime a fracturii, efortul indus poate fi o mică fracție a presiunii nete. Astfel, termenul „urmărire a eforturilor” poate fi utilizat pentru a descrie această creștere a efortului în regiunea ce înconjoară fractura. Dacă o a doua fractură hidrolică este creată paralelă cu o fractură deschisă existentă, și aceasta se încadrează în „urmărirea eforturilor” (și anume distanța la fractura existentă este mai mică decât înălțimea fracturii), a doua fractură poate, prin urmare, observa un efort de închidere mai mare decât efortul *in-situ* original. Ca rezultat, o presiune mai mare poate fi necesară pentru propagarea fracturii și/sau fractura poate avea o lățime mai mică, comparativ cu fractura individuală corespondentă.

[53] O aplicație a studiului de urmărire a eforturilor poate implica proiectarea și optimizarea distanțării fracturilor între multiplele fracturi ce se propagă simultan dintr-o gaură de foraj orizontală. În formațiunile de șisturi bituminoase cu permeabilitate ultra scăzută, fracturile pot fi distanțate apropiat pentru drenarea eficientă a rezervorului. Totuși, efectul de urmărire a eforturilor poate împiedica o fractură ce se propagă în imediata vecinătate a altor fracturi (vezi, de exemplu, *Fisher, M.K., J.R. Heinze, C.D. Harris, B.M. Davidson, C.A. Wright, și K.P. Dunn, Optimizing horizontal completion techniques in the Barnett Shale using microseismic Fracture mapping. SPE 90051 prezentat la SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 26-29*

Septembrie 2004, al cărei întreg conținut este incorporat aici prin citare în ansamblul său).

[54] Interferența între fracturile paralele a fost studiată în trecut (vezi, de exemplu, *Warpinski și Teufel; Britt, L.K. și Smith, M.B., Horizontal Well Completion, Stimulation Optimization, and Risk Mitigation. Paper SPE 125526 prezentat la 2009 SPE Eastern Regional Meeting, Charleston, Septembrie 23-25, 2009; Cheng, Y. 2009. Boundary Element Analysis of the Stress Distribution around Multiple Fracturas: Implications for the Spacing of Perforation Clusters of Hydraulically Fractured Horizontal Wells. Paper SPE 125769 prezentat la 2009 SPE Eastern Regional Meeting, Charleston, Septembrie 23-25, 2009; Meyer, B.R. și Bazan, L.W., A Discrete Fractura Network Model for Hydraulically Induced Fracturas: Theory, Parametric and Case Studies. Paper SPE 140514 prezentat la SPE Hydraulic Fracturing Conference and Exhibition, Woodlands, Texas, USA, ianuarie 24-26, 2011; Roussel, N.P. și Sharma, M.M, Optimizing Fractura Spacing and Sequencing in Horizontal-Well Fracturing, SPEPE, Mai, 2011, pp. 173-184, al căror întreg conținut este incorporat aici prin citare). Studiile pot implica fracturi paralele în condiții statice.*

[55] Un efect al urmăririi eforturilor poate fi acela că fracturile din regiunea mediană a multiplelor fracturi paralele pot avea o lățime mai mică datorită eforturilor de compresiune crescute de la fracturile învecinate (vezi, de exemplu, *Germanovich, L.N. și Astakhov D., Fractura Closure in Extension and Mechanical Interaction of Parallel Joints. J. Geophys. Res., 109, B02208, doi: 10.1029/2002 JB002131 (2004); Olson, J.E., Multi-Fractura Propagation Modeling: Applications to Hydraulic Fracturing in Shales and Tight Sands. 42nd US Rock Mechanics Symposium și 2nd US-Canada Rock Mechanics Symposium, San Francisco, CA, iunie 29 - iulie 2, 2008, al căror întreg conținut este incorporat aici prin citare). Când mai multe fracturi se propagă simultan, distribuție ratei de curgere în interiorul fracturilor poate fi un proces dinamic și poate fi afectat de presiunea netă a fracturilor. Presiunea netă poate fi puternic dependentă de lățimea fracturii și astfel, efectul de urmărire a eforturilor asupra distribuției ratei de curgere și dimensiunilor fracturilor garantează studiul suplimentar.*

[56] Dinamica propagării simultane a mai multor fracturi poate depinde de asemenea de pozițiile relative ale fracturilor inițiale. Dacă fracturile sunt paralele, de exemplu în cazul mai multor fracturi care sunt ortogonale pe o gaură de foraj orizontală,

fracturile se pot respinge unele pe altele, rezultând în fracturi ce se curbează către exterior. Totuși, dacă mai multe fracturi sunt aranjate sub un model eşalonat, de exemplu pentru fracturi inițiate dintr-o gaură de foraj orizontală, care nu este ortogonală pe planul fracturii, interacțiunea între fracturile adiacente pot fi astfel încât vârfurile lor se atrag unul pe celălalt și chiar se unesc (vezi, de exemplu, *Olson, J. E. Fractura Mechanics Analysis of Joints și Veins. PhD dissertation, Stanford University, San Francisco, California (1990); Yew, C.H., Mear, M.E., Chang, C.C., și Zhang, X.C. On Perforating and Fracturing of Deviated Cased Wellbores. Paper SPE 26514 prezentat la SPE 68th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, Oct. 3-6 (1993); Weng, X., Fractura Initiation and Propagation from Deviated Wellbores. Paper SPE 26597 prezentat la SPE 68th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, Oct. 3-6 (1993)*, al căror întreg conținut este incorporat aici prin citare).

[57] Când o fractură hidrolică intersectează o fractură secundară orientată într-o direcție diferită, aceasta poate exercita un efort de închidere adițional asupra fracturii secundare care este proporțional cu presiunea netă. Acest efort poate fi derivat și luat în considerare în calcularea presiunii de deschidere a fisurilor din analiza scurgerilor dependente de presiune din formațiunea fisurată (vezi, de exemplu, *Nolte, K., Fracturing Pressure Analysis for nonideal behavior. JPT, Feb. 1991, 210-218 (SPE 20704) (1991)* (în cele ce urmează "Nolte 1991"), al cărui întreg conținut este incorporat aici prin citare).

[58] Pentru fracturi mai complexe, poate fi prezentă o combinație de diverse interacțiuni de fracturi, așa cum a fost discutat mai sus. Pentru a ține cont în mod adecvat de aceste interacțiuni și pentru a rămâne eficienți din punct de vedere al calculelor, astfel încât să poată fi incorporat într-un model de rețea de fracturi complexe, poate fi construit un cadru de modelare adecvat. O metodă bazată pe o Metodă de Discontinuitate Deplasării 2D (2D DDM) poate fi utilizată pentru calcularea eforturilor induse pe o fractură dată și în roca din restul rețelei de fracturi complexe (vezi, de exemplu, *Olson, J.E., Predicting Fractura Swarms - The Influence of Sub critical Crack Growth and the Crack-Tip Process Zone on Joints Spacing in Rock. In The Initiation, Propagation and Arrest of Joints and Other Fracturas, ed. J.W.Cosgrove și T.Engelder, Geological Soc. Special Publications, London, 231, 73-87 (2004)* (în cele ce urmează "Olson 2004"), al cărui întreg conținut este incorporat aici prin citare). Întoarcerea fracturii poate fi de asemenea modelată pe baza direcției efortului local modificat înainte

de propagarea vârfului fracturii datorită efectului de urmărire a eforturilor. Sunt prezentate rezultatele simulării din modelul UFM care încorporează modelarea interacțiunilor fracturilor.

Descrierea Modelului UFM

[59] Pentru a simula propagarea unei rețele de fracturi complexe care constă din multe fracturi ce se intersectează, pot fi utilizate ecuațiile care guvernează fenomenele fizice de bază ale procesului de fracturare. Ecuațiile de guvernare de bază pot include, spre exemplu, ecuațiile ce guvernează curgerea fluidului în rețeaua de fracturi, ecuația ce guvernează deformarea fracturilor și criteriul de propagare/interacțiune a fracturilor.

[60] Ecuația de continuitate consideră faptul că curgerea fluidului se propagă de-a lungul unei rețele de fracturi cu următoarea conservare de masă:

$$\frac{\partial q}{\partial s} + \frac{\partial(H_{fl}\bar{w})}{\partial t} + q_L = 0 \quad (1)$$

unde q este rata de curgere locală în interiorul fracturii hidraulice de-a lungul lungimii, $\bar{w}$ este o lățime sau deschidere medie la nivelul secțiunii transversale a fracturii în poziția $s=s(x,y)$, H_{fl} este înălțimea fluidului în fractură, și q_L este rata volumului de scurgere prin peretele fracturii hidraulice în matrice per înălțime unitate (viteza la care fluidul de fracturare se infiltrează în mediul permeabil înconjurător), care este exprimată prin modelul de scurgere al lui Carter. Vârfurile fracturilor se propagă ca un front ascuțit, iar lungimea fracturii hidraulice în orice moment t este definită drept $L(t)$.

[61] Proprietățile fluidului de antrenare pot fi definite prin exponentul legii energiei exponent n' (indice comportament fluid) și indicele de consistență K' . Curgerea fluidului poate fi laminară, turbulentă sau curgere Darcy prin masa de agent de susținere, și poate fi descrisă în mod corespunzător prin diferite legi. Pentru cazul general, al curgerii laminare 1D a fluidului din legea energiei în orice ramură dată a fracturii, poate fi utilizată legea Poiseuille (vezi, de exemplu, Nolte, 1991):

$$\frac{\partial p}{\partial s} = -\alpha_0 \frac{1}{\bar{w}^{2n'+1}} \frac{q}{H_{fl}} \left| \frac{q}{H_{fl}} \right|^{n'-1} \quad (1)$$

unde

$$\alpha_0 = \frac{2K'}{\phi(n')^{n'}} \cdot \left(\frac{4n'+2}{n'} \right)^{n'}; \quad \phi(n') = \frac{1}{H_{fl}} \int_{H_{fl}} \left(\frac{w(z)}{\bar{w}} \right)^{\frac{2n'+1}{n'}} dz \quad (2)$$

aici $w(z)$ reprezintă lățimea fracturii în funcție de adâncime în poziția curentă s , α este coeficient, n' este exponentul legii energiei (indice consistență fluid), ϕ este funcția formă, și dz este incrementul de integrare de-a lungul înălțimii fracturii în formulă.

[62] Lățimea fracturii poate fi asociată la presiunea fluidului prin ecuația elasticității. Proprietățile elastice ale rocii (care poate fi considerată un material elastic liniar, izotrop, omogen) pot fi definite prin modulul lui Young E și raportul lui Poisson ν . Pentru o fractură verticală într-un mediu stratificat cu efortul orizontal minim variabil $\sigma_h(x, y, z)$ și presiunea fluidului p , profilul lățimii (w) poate fi determinat dintr-o soluție analitică dată drept:

$$w(x, y, z) = w(p(x, y), H, z) \quad (3)$$

unde W este lățimea fracturii într-un punct cu coordonatele spațiale x, y, z (coordoanatele centrului elementului de fractură); $p(x,y)$ este presiunea fluidului, H este înălțimea elementului de fractură și z este coordonata verticală de-a lungul elementului de fractură în punctul (x,y) .

[63] Deoarece înălțimea fracturilor poate varia, setul de ecuații de guvernare poate include de asemenea calculul creșterii înălțimii așa cum este descris, spre exemplu, în Kresse 2011.

[64] În plus față de ecuațiile descrise mai sus, poate fi satisfăcută condiția de echilibru al volumului global:

$$\int_0^t Q(t)dt = \int_0^{L(t)} H(s,t) \bar{w}(s,t) ds + \int_{H_L} \int_0^t \int_0^{L(t)} 2g_L ds dt dh_l \quad (4)$$

unde g_L este viteza de scurgere a fluidului, $Q(t)$ este rata de injectare dependentă de

timp, $H(s,t)$ înălțimea fracturii în punctul spațial $s(x,y)$ și la momentul de timp t , ds este incrementul de lungime pentru integrarea de-a lungul lungimii fracturii, dt este incrementul de timp, dh_i este înălțimii de scurgere, H_L este înălțimea de scurgere, și s_0 este un coeficient de pierdere a jetului. Ecuația (5) asigură că volumul total de fluid pompat în timpul t este egal cu volumul de fluid din rețeaua de fracturi și volumul scurs din fractură până la momentul de timp t . În acest caz, $L(t)$ reprezintă lungimea lui HFN la momentul de timp t și S_0 este coeficientul de pierdere a jetului. Condițiile limită pot necesita ca debitul de curgere, presiunea netă și lățimea fracturii să fie zero la toate vârfurile de fracturi.

[65] Sistemul de ecuații 1 - 5, împreună cu condițiile inițiale și limită, pot fi utilizate pentru a reprezenta un set de ecuații de guvernare. Combinarea acestor ecuații și discretizarea rețelei de fracturi în mici elemente poate conduce la un sistem neliniar de ecuații în termeni de presiune a fluidului p în fiecare element, simplificat drept $f(p) = 0$, care poate fi rezolvat prin utilizarea unei metode Newton-Raphson amortizate.

[66] Interacțiunea fracturilor poate fi luată în considerare pentru modelarea propagării fracturii hidraulice în rezervoarele fracturate natural. Aceasta include, spre exemplu, interacțiunea între fracturile hidraulice și fracturile naturale, precum și interacțiunea între fracturile hidraulice. Pentru interacțiunea între fracturile hidraulice și naturale un criteriu de intersecție semi-analitic poate fi implementat în UFM utilizând, spre exemplu, abordarea descrisă în Gu și Weng 2010, și Gu și alții 2011.

Modelarea efectului de urmărire a efortului

[67] Pentru fracturile paralele, urmărirea efortului poate fi reprezentată prin suprapunerea eforturilor de la fracturile învecinate. Fig. 2 este o ilustrare schematică a unei fracturi 2D 200 în jurul unui sistem de coordonate având o axă x și o axă y . Diversele puncte de-a lungul fracturilor 2D, cum ar fi o primă extremitate la $h/2$, o a doua extremitate la $-h/2$ și un punct median sunt extinse la un punct de observație (x, y) . Fiecare linie L se extinde la unghiurile θ_1, θ_2 față de punctele de-a lungul fracturii 2D la punctul de observație.

[68] Câmpul de eforturi din jurul unei fracturi 2D cu presiunea internă p poate fi calculat utilizând, spre exemplu, tehnicile descrise în Warpinski și Teufel. Efortul care afectează lățimea fracturii este σ_x și poate fi calculat din:

$$\sigma_x = p \left[1 - \frac{\bar{L}}{\sqrt{\bar{L}_1 \bar{L}_2}} \cos \left(\theta - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) - \frac{\bar{L}}{(\bar{L}_1 \bar{L}_2)^{\frac{3}{2}}} \sin \theta \sin \left(\frac{3}{2} (\theta_1 + \theta_2) \right) \right] \quad (5)$$

unde

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan \left(-\frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right) \\ \theta_1 &= \arctan \left(-\frac{\bar{x}}{1 + \bar{y}} \right) \\ \theta_2 &= \arctan \left(\frac{\bar{x}}{1 - \bar{y}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

și în care σ_x este efortul în direcția x, p este presiunea internă, și $\bar{x}, \bar{y}, \bar{L}, \bar{L}_1, \bar{L}_2$ sunt coordonatele și distanțele din Figura 2 normalizate cu jumătate din înălțimea fracturii $h/2$. Deoarece σ_x variază în direcția y, precum și în direcția x, un efort ponderat pe înălțimea fracturii poate fi utilizat în calcularea efectului de urmărire a efortului.

[69] Ecuația analitică dată mai sus poate fi utilizată pentru calcularea unui efort mediu efectiv al unei fracturi pe o fractură paralelă adiacentă și poate fi inclus în efortul de închidere efectiv pe acea fractură.

[70] Pentru rețele de fracturi mai complexe, fracturile se pot orienta în direcții diferite și se pot intersecta unele cu altele. Figura 3.1 prezintă o rețea de fracturi complexe 300 ilustrând efectele de urmărire a efortului. Rețeaua de fracturi 300 include fracturile hidraulice 303 extinzându-se dintr-o gaură de foraj 304 și intersectându-se cu alte fracturi 305 din rețeaua de fracturi 300.

[71] O abordare mai generală poate fi utilizată pentru a calcula efortul efectiv pe fiecare ramură de fractură dată față de restul rețelei de fracturi. În modelul UFM, interacțiunile mecanice între fracturi pot fi modelate pe baza unei Metode de Discontinuitate a Deplasării 2D îmbunătățite (DDM) (Olson 2004) pentru calcularea eforturilor introduse (vezi, de exemplu, Figura 3.2).

[72] Într-o soluție de discontinuitate a deplasării, deformare plană, 2D (vezi, de exemplu, Crouch, S.L. și Starfield, A.M., *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*, George Allen & Unwin Ltd, Londra. Fisher, M.K. (1983) (în cele ce urmează Crouch și Starfield 1983), al cărei întreg conținut este incorporat aici prin citare) poate fi utilizat

pentru a descrie eforturile normale și de forfecare (σ_n and σ_s) ce acționează asupra unui element de fractură indusă de discontinuitățile de deplasare de deschidere și forfecare (D_n și D_s) din toate elementele de fracturi. Pentru a ține cont de efectul 3D datorat înălțimii finite a fracturii, poate fi utilizat Olson 2004 pentru a asigura un factor de corecție 3D pentru a influența coeficienții C^j în combinație cu ecuațiile de elasticitate modificate ale 2D DDM, după cum urmează:

$$\begin{aligned}\sigma_n^i &= \sum_{j=1}^N A^{ij} C_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A^{ij} C_{nn}^{ij} D_n^j \\ \sigma_s^i &= \sum_{j=1}^N A^{ij} C_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A^{ij} C_{sn}^{ij} D_n^j\end{aligned}\quad (7)$$

unde A este o matrice a coeficienților de influență descriși în ec.(9), N este un număr total de elemente din rețea a căror interacțiune este considerată, i este elementul considerat, și j=1, N sunt celelalte elemente din rețea a căror influență asupra eforturilor pe elementul i este calculată; și în care C^j sunt coeficienții de influență elastici, deformație plană, 2D. Aceste expresii pot fi găsite în Crouch și Starfield 1983.

[73] Elementele i și j din Figura 3.2 ilustrează schematic variabilele i și j din ecuația (8). Discontinuitățile D_s și D_n aplicate la Elem j sunt ilustrate de asemenea în Figura 3.2. D_n poate fi același cu lățimea fracturii, și efortul de forfecare s poate fi 0 așa cum este ilustrat. Discontinuitatea de deplasare de la Elem j creează un efort pe Elem i, așa cum este ilustrat prin σ_s și σ_n .

Factorul de corecție 3D sugerat de Olson 2004 poate fi reprezentat după cum urmează:

$$A^{ij} = 1 - \frac{d_{ij}^\beta}{\left[d_{ij}^2 + (h/\alpha)^2\right]^{\beta/2}} \quad (8)$$

unde h este înălțimea fracturii, d_{ij} este distanța între elementele i și j, α și β sunt parametri de reglaj. Ec. 9 arată faptul că factorul de corecție 3D poate conduce la

descompunerea interacțiunii între oricare două elemente de fractură când distanța crește.

[75] În modelul UFM, la fiecare etapă de timp, eforturile adiționale induse datorită efectelor de urmărire a efortului pot fi calculate. Poate fi considerat că în orice moment de timp, lățimea fracturii este egală cu discontinuitățile de deplasare normale (D_n) și efortul de forfecare la suprafața fracturii este zero, și anume, $D_n' = w_j$, $\sigma_s' = 0$. Înlocuind aceste două condiții în Ec. 8, pot fi găsite discontinuitățile de deplasare de forfecare (D_s) și efortul normal indus pe fiecare element de fractură (σ_n).

[76] Efectele eforturilor induse de urmărirea efortului pe modelul de propagare a rețelei de fracturi poate fi descris în două sensuri. Mai întâi, în timpul iterației de presiune și lățime, eforturile originale *in-situ* de pe fiecare element de fractură pot fi modificate prin adăugarea efortului normal datorat efectului de urmărire a efortului. Acesta poate afecta direct presiunea fracturii și distribuția lățimii care pot rezulta într-o modificare a dezvoltării fracturii. În al doilea rând, prin includerea eforturilor induse de urmărirea efortului (eforturile normale și de forfecare), câmpurile de eforturi locale din fața vârfurilor de propagare pot fi de asemenea modificate, lucru care poate cauza ca direcția efortului principal local să devieze de la direcția originală a efortului *in-situ*. Această direcție modificată a efortului principal local poate rezulta în întoarcerea fracturii de la planul său de propagare original și poate afecta suplimentar modulul de propagare al rețelei de fracturi.

Metoda Discontinuității Deplasării 3D (3D DDM)

[77] În plus față de metoda 2D DDM descrisă aici, o metodă bazată pe 3D DDM poate fi utilizată pentru diverse aplicații. Pentru o rețea de fracturi hidraulice dată care este discretizată în elemente dreptunghiulare mici conectate, orice element dreptunghiular dat poate fi supus la o discontinuitate de deplasare între două fețe ale elementului dreptunghiular reprezentat prin D_x , D_y și D_z , și eforturile induse în rocă în orice punct (x, y, z) pot fi calculate utilizând soluția 3D DDM prezentată în cadrul de față.

[78] Figura 17 prezintă o diagramă schematică 1700 a unui sistem de coordonate local x, y, z pentru un element dreptunghiular 1740 într-un plan $x-y$. Această figură ilustrează un plan al fracturii din jurul axei de coordonate. Deplasarea indusă și câmpul de eforturi poate fi exprimat drept:

$$u_x = [2(1-\nu)f_{,z} - zf_{,xx}]D_x - zf_{,xy}D_y - [(1-2\nu)f_{,x} + zf_{,xz}]D_z \quad (10)$$

$$u_y = -zf_{,xy}D_x + [2(1-\nu)f_{,z} - zf_{,yy}]D_y - [(1-2\nu)f_{,y} + zf_{,yz}]D_z \quad (11)$$

$$u_z = [(1-2\nu)f_{,x} - zf_{,xz}]D_x + [(1-2\nu)f_{,y} - zf_{,yz}]D_y + [2(1-\nu)f_{,z} - zf_{,zz}]D_z \quad (12)$$

$$\sigma_{xx} = 2G\{[2f_{,xz} - zf_{,xxx}]D_x + [2f_{,yz} - zf_{,xyy}]D_y + [f_{,zz} + (1-2\nu)f_{,yy} - zf_{,xxz}]D_z\} \quad (13)$$

$$\sigma_{yy} = 2G\{[2f_{,xz} - zf_{,xyy}]D_x + [2f_{,yz} - zf_{,yyy}]D_y + [f_{,zz} + (1-2\nu)f_{,xx} - zf_{,yyz}]D_z\} \quad (14)$$

$$\sigma_{zz} = 2G\{-zf_{,xxz}D_x - zf_{,yyz}D_y + [f_{,zz} - zf_{,xxx}]D_z\} \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = 2G\{[(1-\nu)f_{,yz} - zf_{,xyy}]D_x + [(1-\nu)f_{,xz} - zf_{,xyy}]D_y - [(1-2\nu)f_{,xy} + zf_{,xyz}]D_z\} \quad (16)$$

$$\tau_{yz} = 2G\{-[f_{,xy} + zf_{,xyz}]D_x + [f_{,zz} + f_{,xx} - zf_{,yyz}]D_y - zf_{,yzz}D_z\} \quad (17)$$

$$\tau_{xz} = 2G\{[(f_{,zz} + f_{,yy} - zf_{,xxx})D_x - [f_{,xy} + zf_{,xyz}]D_y - zf_{,xxz}D_z\} \quad (18)$$

Unde a și b sunt jumătăți de lungimi ale muchiilor dreptunghiului, deplasarea indusă și câmpul de solicitări putând fi exprimate după cum urmează:

$$f(x,y,z) = \frac{1}{8\pi(1-\nu)} \iint_A [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2]^{-1/2} d\xi d\eta, \quad |\xi| \leq a, |\eta| \leq b \quad (19)$$

unde A este aria dreptunghiului, (x,y,z) este sistemul de coordonate inițiat la element, (ξ,η,0) sunt coordonatele în punctul P, și ν este raportul lui Poisson.

[79] Pentru orice punct de observație dat P(x,y,z) în spațiul 3D, efortul indus în punctul P (x,y,z) cu rata de producție Q(ξ,η,0) poate fi calculat prin suprapunerea eforturilor de la toate elementele de fracturi, și prin aplicarea unei transformări de coordonate. Tehnici exemplificative implicând 3D DDM sunt prevăzute în Crouch, S.L. și Starfield, A.M. (1990), *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*, Unwin Hyman, Londra, al cărui întreg conținut este incorporat aici prin citare.

[80] Interacțiunea între multiplele fracturi hidraulice ce se propagă sau în cazul de față denumit efectul de urmărire a eforturilor, poate influența creșterea înălțimii fracturilor

pentru fracturile ce se propagă în același strat sau straturi diferite în adâncime, care poate avea implicații asupra succesului unui tratament al fracturilor.

[81] În cel puțin un exemplu de realizare a modelului de fracturare hidraulic descris în cadrul de față, modelul poate integra suplimentar metoda 3D DDM pentru calcularea câmpului de eforturi 3D indus împrejurul fracturilor hidraulice ce se propagă, și poate încorpora modificarea de efort indusă de-a lungul adâncimii verticale într-un calcul al înălțimii fracturii al modelului de fractură.

[82] Spre exemplu, pentru două fracturi paralele 1811.1, 1811.2, așa cum este ilustrat în diagrama schematică 1800 din Fig. 18, creșterea înălțimii poate fi promovată sau eliminată în funcție de înălțimea relativă a fracturii. Pentru fracturile inițiate de la adâncimi diferite, prezența fracturii adiacente poate ajuta la prevenirea unei fracturi să se dezvolte în stratul ocupat de cealaltă fractură datorită efectului de urmărire a eforturilor verticale. Spre exemplu, datorită interacțiunii între fracturile 1811.1, 1811.2 la adâncimi diferite, fractura 1811.1 poate crește într-o direcție către în sus și fractura 1811.2 poate crește într-o direcție în jos, așa cum este indicat prin săgeți.

Validarea Modelului de Urmărire a Eforturilor

[83] Validarea modelului UFM pentru cazurile de fracturi cu două aripi poate fi realizată utilizând, spre exemplu, Weng 2011 sau Kresse 2011. Validarea poate fi realizată de asemenea utilizând abordarea modelării urmăririi eforturilor. Cu titlu de exemplu, rezultatele pot fi comparate utilizând 2D DDM la Flac 3D așa cum este prevăzut în *Itasca Consulting Group Inc., 2002, FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 2.1, Minneapolis: ICG (2002)* (în cele ce urmează "Itasca, 2002").

Compararea 2D DDM îmbunătățit la Flac3D

[84] Factorii de corecție 3D sugerați de Olson 2004 conțin două constante empirice α și β . Valorile lui α și β pot fi calibrate prin compararea eforturilor obținute din soluțiile numerice 2D DDM îmbunătățit) la soluția analitică pentru o fractură cu deformăție plană cu lungime infinită și înălțime finită. Modelul poate fi validat suplimentar prin compararea rezultatelor metodei 2D DDM cu soluții numerice tridimensionale complete, utilizând, spre exemplu, metoda FLAC3D, pentru două fracturi paralele cu lungimi și înălțimi finite.

[85] Problema validării este prezentată în Figura 4. Figura 4 ilustrează o diagramă

schematică 400 comparând metoda 2D DDM îmbunătățită cu metoda Flac3D pentru două fracturi drepte paralele. Așa cum este prezentat în diagrama 400, două fracturi paralele 407.1, 407.2 sunt supuse la eforturile σ_x , σ_y de-a lungul unei axe de coordonate x , y . Fracturile au lungimea $2L_{xf}$, și presiunea fracturii p_1 , p_2 , respectiv. Fracturile sunt la distanța s .

[86] Fractura din metoda Flac3D poate fi simulată drept două suprafețe în aceeași locație însă cu puncte de rețea neatașate. Presiunea fluidului internă, constantă poate fi aplicată drept efortul normal pe rețele. Fracturile pot fi supuse de asemenea la eforturi de la distanță σ_x și σ_y . Două fracturi pot avea aceeași lungime și înălțime cu raportul înălțime/jumătate de lungime = 0,3.

[87] Eforturile de-a lungul axei x ($y = 0$) și axei y ($x = 0$) pot fi comparate. Două fracturi apropiate ($s/h = 0,5$) pot fi simulate așa cum este prezentat în comparația din Figurile 5.1-5.3. Aceste figuri asigură o comparație a metodei 2D DDM extinse cu metoda Flac3D: Eforturile de-a lungul axei x ($y = 0$) și axei y ($x = 0$).

[88] Aceste figuri includ graficele 500.1, 500.2, 500.3, respectiv, ilustrând metoda 2D DDM și metoda Flac3D pentru fracturile extinse pentru σ_y de-a lungul axei y , σ_x de-a lungul axei y , și respectiv σ_y de-a lungul axei x . Figura 5.1 transpune σ_y/p (y -axis) în raport cu distanța normalizată față de fractură (axa x) utilizând metodele 2D DDM și Flac3D. Figura 5.2 transpune σ_x/p (axa y) față de distanța normalizată față de fractură (axa x) utilizând metodele 2D DDM și Flac3D. Figura 5.3 transpune σ_y/p (y -axis) față de distanța normalizată față de fractură (axa x) utilizând metodele 2D DDM și Flac3D. Locația L_f a vârfului fracturii este ilustrată de-a lungul liniei x/h .

[89] Așa cum este prezentat în Figurile 5.1-5.3, eforturile simulate din abordarea 2D DDM îmbunătățită cu factorul de corecție 3D se potrivesc destul de bine cu cele din rezultatele simulatorului 3D complet, care indică faptul că factorul de corecție permite capturarea efectului 3D din înălțimea fracturii pe câmpul de eforturi.

Comparația cu modelul CSIRO

[90] Modelul UFM care încorporează abordarea 2D DDM îmbunătățită poate fi validat față de simulatorul 2D DDM prin CSIRO (vezi, de exemplu, Zhang, X., Jeffrey, R.G., și Thiercelin, M. 2007. *Deflection and Propagation of Fluid-Driven Fractures at Frictional Bedding Interfaces: A Numerical Investigation. Journal of Structural Geology*, 29: 396-410, (hereafter "Zhang 2007") al cărui întreg conținut este incorporat aici prin

citare). Această abordare poate fi utilizată, spre exemplu, în cazul limită al înălțimii foarte mari a fracturii în care abordările 2D DDM nu consideră efectele 3D ale înălțimii fracturilor.

[91] Poate fi utilizată compararea influenței a două fracturi ce se propagă apropiat pe traseele de propagare ale celeilalte. Propagarea a două fracturi hidraulice inițiate paralel una cu cealaltă (propagându-se de-a lungul direcției efortului maxim local) poate fi simulată pentru configurații, cum ar fi: 1) puncte de inițiere unele deasupra celorlalte și decalate unele de altele pentru izotrop, și 2) câmpuri de eforturi mult anizotrope. Traseul de propagare al fracturilor și presiunea în interiorul fiecărei fracturi pot fi comparate pentru modelul UFM și codul CSIRO pentru datele de intrare date în Tabelul 1.

Rată de injectare	0,106m ³ /s	40 bbl/min
Anizotropie efort	0,9MPa	130 psi
Modulul lui Young	3 x 10 ¹⁰ Pa	4,35e+6 psi
Raportul lui Poisson	0,35	0,35
Viscozitate fluid	0,001pa-s	1 cp
Greutate specifică fluid	1,0	1,0
Efort orizontal minim	46,7MPa	6773 psi
Efort orizontal maxim	47,6MPa	6903 psi
Tenacitate fractură	1MPa-m ^{0.5}	1000 psi/in ^{0.5}
Înălțime fractură	120m	394 ft

Tabelul 1 Date de intrare pentru validare față de modelul CSIRO

[92] Când două fracturi sunt inițiate paralele una cu cealaltă cu puncte de inițiere separate cu $dx = 0$, $dy = 33$ ft (10,1 m) (câmpul de eforturi orizontale maxime este orientat în direcția x), ele se pot întoarce una față de cealaltă datorită efectului de urmărire a efortului.

[93] Traseele de propagare pentru câmpurile de eforturi izotrope și anizotrope sunt prezentate în Figurile 6.1 și 6.2. Aceste figuri sunt graficele 600.1, 600.2 ilustrând traseele de propagare pentru două fracturi inițial paralele 609.1, 609.2 în câmpuri de eforturi izotrop și respectiv anizotrop. Fracturile 609.1 și 609.2 sunt inițial paralele lângă

punctele de injectare **615.1**, **615.2**, însă diverg pe măsură ce acestea de depărtează de ele. Comparând cazul izotrop, curburile fracturilor în cazul anizotropiei eforturilor sunt ilustrate ca fiind mai mici. Acest lucru se poate datora competiției între efectul de urmărire a eforturilor care tinde să întoarcă fracturilor depărtat una de alta, și câmpurile de eforturi depărtate, care împing fracturile să se propage în direcția efortului orizontal maxim (direcția x). Influența efortului din câmp depărtat devine dominantă pe măsură ce distanța dintre fracturi crește, caz în care fracturile pot tinde să se propage paralel cu direcția efortului orizontal maxim.

[94] Figurile 7.1 și 7.2 ilustrează graficele **700.1**, **700.2** prezentând o pereche de fracturi inițiate din două puncte de injectare diferite **711.1**, **711.2**, respectiv. Aceste figuri prezintă o comparație pentru cazul când fracturile sunt inițiate din puncte separate de o distanță $dx = dy = (10,1\text{m})$ pentru câmpurile de eforturi izotrop și respectiv anizotrop. În aceste figuri, fracturile **709.1**, **709.2** tind să se propage una către alta. Exemple de tip similar de comportament au fost observate în experimentele de laborator (vezi, de exemplu, Zhang 2007).

[95] Așa cum a fost indicat mai sus, abordarea 2D DDM îmbunătățită implementată în modelul UFM poate fi capabilă să captureze efectele 3D ale înălțimii finite a fracturii asupra interacțiunii fracturilor și modelului de propagare, concomitent cu asigurarea unei eficiențe de calcul. Poate fi asigurată o bună estimare a câmpului de eforturi pentru o rețea de fracturi hidraulice verticale și direcția (modelul) de propagare a fracturilor.

Exemple de cazuri

Cazul #1 Fracturi paralele în puțuri orizontale

[96] Figura 8 este un grafic schematic **800** al fracturilor transversale paralele **811.1**, **811.2**, **811.3** ce se propagă simultan din mai multe grupuri de perforații **815.1**, **815.2**, **815.3**, respectiv, în jurul unei găuri de foraj orizontale **804**. Fiecare din fracturile **811.1**, **811.2**, **811.3** asigură un debit de curgere diferit q_1 , q_2 , q_3 care este parte a fluxului total q_t la o presiune p_0 .

[97] Când starea formațiunii și perforațiile sunt la fel pentru toate fracturile, fracturile pot avea aproximativ aceleași dimensiuni dacă presiunea de frecare din gaura de foraj dintre grupul de perforații este proporțională mică. Acest lucru poate fi considerat în cazul în care fracturile sunt suficient de mult separate și efectele de

urmărire a eforturilor sunt neglijabile. Când distanțarea între fracturi este în interiorul regiunii de influență a urmăririi eforturilor, fracturile pot fi afectate în lățime, și în altă dimensiune a fracturii. Pentru a ilustra acest lucru, un exemplu simplu de cinci fracturi paralele poate fi considerat.

[98] În acest exemplu, fracturile sunt considerate ca având o înălțime constantă de 100 ft (30,5 m). Distanțarea între fracturi este 65 ft (19,8m). Alți parametri de intrare sunt dați în Tabelul 2.

Modulul lui Young	$6,6 \times 10^6 \text{ psi} = 4,55 \times 10^{10} \text{ Pa}$
Raportul lui Poisson	0,35
Debit	12,2 bbl/min = 0,032 m ³ /s
Viscozitate	300 cp = 0,3 Pa-s
Înălțime	100 ft = 30,5m
Coeficient de scurgere	$3,9 \times 10^{-2} \text{ m/s}^{1/2}$
Anizotropie efort	200 psi = 1,4 Mpa
Distanțare fracturi	65 ft = 19,8m
Nr. de perforații per fractură	100

Tabelul 2 Parametrii de intrare pentru Cazul #1

Pentru acest caz simplu, un model convențional Perkins-Kern-Nordgren (PKN) (vezi de exemplu, *Mack, M.G. and Warpinski, N.R., Mechanics of Hydraulic Fracturing. Chapter 6, Reservoir Stimulation, 3rd Ed., eds. Economides, M.J. and Nolte, K.G. John Wiley & Sons (2000)*) pentru mai multe fracturi poate fi modificat prin incorporarea calculului de urmărire a eforturilor, așa cum este dat din Ec. 6. Creșterea efortului de închidere poate fi aproximat prin ponderarea efortului calculat din Ec. 6 pe întreaga fractură. De notat că acest model PKN simplist poate să nu simuleze întoarcerea fracturii datorită efectului de urmărire a eforturilor. Rezultatele din acest model simplu pot fi comparate cu rezultatele din modelul UFM care încorporează calculația urmăririi eforturilor punct cu punct de-a lungul traseelor complete ale fracturilor, precum și întoarcerea fracturilor.

[99] Figura 9 prezintă rezultatele simulării lungimilor fracturilor pentru cinci fracturi, calculate din ambele modele. Fig. 9 este un grafic 900 ilustrând lungimea (axa

y) față de timp (t) pentru cinci fracturi paralele în timpul injectării. Liniile 917.1-917.5 sunt generate din modelul UFM. Liniile 919.1-919.5 sunt generate din modelul PKN simplist.

[100] Geometria fracturii și conturul lățimii din modelul UFM pentru cele cinci fracturi din Figura 9 sunt prezentate în Figura 10. Figura 10 este o diagramă schematică 1000 ilustrând fracturile 1021.1-1021.5 în jurul unei găuri de foraj 1004.

[101] Fractura 1021.3 este cea din mijloc dintre cele cinci fracturi, iar fracturile 1021.1 și 1021.5 sunt cele exterioare. Deoarece fracturile 1021.2, 1021.3, și 1021.4 au lățime mai mică decât cea a celor exterioare datorită efectului de urmărire a eforturilor, acestea au o rezistență la curgere mai mare, primesc un debit de curgere mai redus și au lungime mai scurtă. Așadar, efectele de urmărire a eforturilor pot fi lățimea fracturii și de asemenea lungimea fracturii în condiții dinamice.

[102] Efectul urmăririi eforturilor asupra geometria fracturii poate fi influențat de mulți parametri. Pentru a ilustra efectul unora dintre acești parametri, lungimi de fracturi calculate pentru cazurile cu distanțare între fracturi variabilă, frecare de perforație și anizotropie a eforturilor, sunt prezentate în Tabelul 3.

[103] Figurile 11.1 și 11.2 prezintă geometria fracturilor prognozată prin modelul UFM pentru cazul frecării de perforație mare și cazul distanțării mari între fracturi (de exemplu, aproximativ 120 ft (36,6 m)). Figurile 11.1 și 11.2 sunt diagrame schematice 1100.1 și 1100.2 ilustrând cinci fracturi 1123.1-1123.5 din jurul unei găuri de foraj 1104. Când frecarea de perforație este mare, poate fi prevăzută o forță de deviere mare care distribuie uniform debitul de curgere în toate grupurile de perforații. În consecință, efectul de urmărire a eforturilor poate fi depășit și lungimile de fracturi rezultate pot deveni aproximativ egale, așa cum este prezentat în Figura 11.1. Când distanțarea între fracturi este mare, efectul de urmărire a eforturilor poate fi disipat, și fracturile pot avea aproximativ aceleași dimensiuni cu cele prezentate în Figura 11.2.

Frac	Caz de bază	120 ft distanțare (36.6 m)	Nr. de perforații = 2	Anizotropie = 50 psi (345000Pa)
1	133	113	105	111
2	93	104	104	95

3	83	96	104	99
4	93	104	100	95
5	123	113	109	102

Tabelul 3 Influența diversilor parametri asupra geometriei fracturii

Cazul #2 Fracturi complexe

[104] Într-un exemplu din Figura 12, poate fi utilizat modelul UFM pentru a simula un tratament al fracturilor hidraulice în 4 etape într-un puț orizontal dintr-o formațiune de sist. Vezi, de exemplu, *Cipolla, C., Weng, X., Mack, M., Ganguly, U., Kresse, O., Gu, H., Cohen, C. și Wu, R., Integrating Microseismic Mapping and Complex Fractura Modeling to Characterize Fractura Complexity. Paper SPE 140185 presented at the SPE Hydraulic Fracturing Conference and Exhibition, Woodlands, Texas, USA, ianuarie 24-26, 2011*, (în cele ce urmează "Cipolla 2011") al cărui întreg conținut este incorporat aici prin citare. Puțul poate fi tubat și cementat, și fiecare etapă pompată prin trei sau patru grupuri de perforații. Fiecare din cele patru etape poate consta din aproximativ 25,000 bbls (4000 m³) de fluid și 440,000 lbs (2e+6kg) de agent de susținere. Date extinse pot fi disponibile la nivelul puțului, incluzând diagramele sonice avansate care asigură o estimare a efortului orizontal minim și maxim. Date de mapare microseismice pot fi disponibile pentru toate etapele. Vezi, de exemplu, *Daniels, J., Waters, G., LeCalvez, J., Lassek, J., și Bentley, D., Contacting More of the Barnett Shale Through an Integration of Real-Time Microseismic Monitoring, Petrophysics, and Hydraulic Fractura Design. Paper SPE 110562 prezentat la 2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, USA, Octombrie 12-14, 2007*. Acest exemplu este prezentat în Figura 12. Fig. 12 este un grafic ilustrând maparea microseismică a evenimentelor microseismice 1223 în diferitele etape din jurul unei găuri de foraj 1204.

[105] Anizotropia eforturilor din diagramele sonice avansate, indică o anizotropie a eforturilor mai ridicată în secțiunea din aval a puțului comparativ cu partea din amonte. O interpretare seismică 3D avansată poate indica că tendința fracturii naturale dominante se modifică de la NE-SV în secțiunea din aval la NV-SE în secțiunea din amonte din lateral. Vezi, de exemplu, *Rich, J.P. și Ammerman, M., Unconventional Geophysics for Unconventional Plays. Paper SPE 131779 prezentat la Unconventional Gas Conference,*

Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Februarie 23-25, 2010, al cărui întreg conținut este incorporat aici prin citare.

[106] Rezultatele simulării se pot baza pe modelul UFM fără incorporarea întregii calculații a urmăririi eforturilor (vezi, de exemplu, *Cipolla 2011*), incluzând efortul de forfecare și întoarcerea fracturilor (vezi, de exemplu, *Weng 2011*). Simularea poate fi actualizată cu modelul complet al eforturilor așa cum este furnizat în cadrul de față. Figurile 13.1-13.4 prezintă o vedere plană a unei rețele de fracturi simulate 1306 în jurul unei găuri de foraj 1304 pentru toate cele patru etape, respectiv, și comparația acestora cu măsurătorile microseismice 1323.1-1323.4, respectiv.

[107] Din rezultatele simulării din Figurile 13.1-13.4 se poate vedea că pentru Etapele 1 și 2, fracturile apropiate nu diverg semnificativ. Acest lucru se poate datora anizotropiei ridicate a eforturilor în secțiunea din aval a găurii de foraj. Pentru Etapele 3 și 4, când anizotropia eforturilor este mai scăzută, poate fi văzută o divergență mare a fracturilor ca rezultat al efectului de urmărire a eforturilor.

Cazul #3 Exemple multi-etape

[108] Cazul #3 este un exemplu prezentând modul în care urmărirea eforturilor din etapele anterioare poate influența modelul de propagare al rețelelor de fracturi hidraulice pentru etapele de tratament următoare, rezultând în modificarea imaginii totale a rețelei de fracturi hidraulice generate pentru cazul de tratament în patru etape.

[109] Acest caz include patru etape de tratament a fracturilor hidraulice. Puțul este tubat și cement. Etapele 1 și 2 sunt pompate prin trei grupuri perforate, și Etapele 3 și 4 sunt pompate prin patru grupuri perforate. Pânza de rocă este izotropă. Parametrii de intrare sunt listați în Tabelul 4 de mai jos. Vederea de sus a rețelei de fracturi hidraulice totale fără și cu luarea în considerare a urmăririi eforturilor din etapele anterioare sunt prezentate în Figurile 13.1-13.4.

Modulul lui Young	$4,5 \times 10^6$ psi=3,1e+10Pa
Raportul lui Poisson	0,35
Debit	30,9 bpm=0,082m ³ /s
Viscozitate	0.5 cp=0,0005pa-s
Înălțime	330 ft=101m
Timp de pompare	70 min

Tabelul 4 Parametrii de intrare pentru Cazul #3

[110] Figurile 14.1-14.4 sunt diagrame schematice 1400.1-1400.4 ilustrând o rețea de fracturi 1429 în diverse etape din timpul operației de fracturare. Figura 14.1 prezintă o rețea de fracturi discrete (DFN) 1429 înainte de tratament. Figura 14.2 ilustrează o DFN simulată 1429 după o primă etapă de tratament. DFN 1429 are fracturi hidraulice propagate (HFN) 1431 extinzându-se din aceasta datorită primei etape de tratament. Figura 14.3 prezintă DFN ilustrând o HFN simulată 1431.1-1431.4 propagată în timpul a patru etape, respectiv, însă fără a lua în considerare efectele etapei anterioare. Figura 14.4 prezintă rețeaua DFN ilustrând facturile HFN 1431.1, 1431.2'-1431.4' propagate în timpul celor patru etape, însă luând în considerare fracturile, urmărirea de forturi și fracturile HFN din etapele anterioare.

[111] Când etapele sunt generate separat, acestea pot să nu se vadă unele pe altele, așa cum este indicat în Figura 14.3. Când urmărirea eforturilor și fracturilor HFN din etapele anterioare sunt luate în considerare, ca în Figura 14.4, modelul de propagare se poate modifica. Fracturile hidraulice 1431.1 generate pentru prima etapă este aceeași atât pentru scenariile ambelor cazuri, așa cum este prezentat în Figurile 14.3 și 14.4. Modelul de propagare din a doua etapă 1431.2 poate fi influențat de prima etapă prin urmărirea eforturilor, precum și prin noua rețea DFN (incluzând fracturile HFN 1431.1 din Etapa 1), rezultând în modificarea modelelor de propagare la fracturile HFN 1431.2'. HFN 1431.1' poate începe să urmărească fracturile HFN 1431.1 creată în etapa 1, ținând cont de aceasta. A treia etapă 1431.3 poate urmări o fractură hidraulică creată în timpul celei de-a doua etape de tratament 1431.2, 1431.2', și poate să nu se propage prea departe datorită efectului de urmărire a eforturilor din Etape 2, așa cum este indicat prin

1431.3 față de 1431.3'. Etapa 4 (1431.4) poate tinde să se întoarcă din etapa trei când aceasta poate, însă poate urmări fractura HFN 1431.3' din etapele anterioare când le întâlnește și poate fi ilustrată drept fractura HFN 1431.4' în Figura 14.4.

[112] Este prezentată o metodă pentru calcularea urmăririi eforturilor într-o rețea de fracturi hidraulice complexe. Metoda poate implica o Metodă de Discontinuitate a Deplasării 2D îmbunătățită sau 3D cu corecția pentru înălțimea finită a fracturii. Metoda poate fi utilizată pentru a aproxima interacțiunea dintre diferitele ramuri de fracturi într-o rețea de fracturi complexe pentru problema fracturilor în mod fundamental 3D. Această calculație a urmăririi eforturilor poate fi incorporată în UFM, un model de rețea de fracturi complexe. Rezultatele pentru cazurile simple de două fracturi prezintă fracturi care se pot atrage sau respinge una pe cealaltă în funcție de pozițiile lor relative inițiale, și compararea favorabilă cu un model de fracturi hidraulice ne-plane 2D independent.

[113] Simulările mai multor fracturi paralele multiple dintr-un puț orizontal pot fi utilizate pentru a confirma comportamentul a două fracturi exterioare care pot fi mai dominante, în timp ce fracturile interioare au o lungime și lățime de fractură reduse datorită efectului de urmărire a eforturilor. Acest comportament poate depinde de asemenea de alți parametri, cum ar fi frecarea de perforare și distanțarea fracturilor. Când distanțarea fracturilor este mai mare decât înălțimea fracturilor, efectul de urmărire a eforturilor se poate diminua și pot exista diferențe semnificative între multiplele fracturi. Când frecarea de perforare este mare, poate fi prevăzută o deviere suficientă pentru distribuția curgerii egal între grupurile de perforații, și dimensiunile fracturilor pot deveni aproximativ egale în pofida efectului de urmărire a eforturilor.

[114] Când sunt create fracturi complexe, dacă formațiunea are o anizotropie redusă a eforturilor, interacțiunea fracturilor poate conduce la o divergență dramatică a fracturilor, atunci când acestea tind să se respingă unele pe altele. Pe de altă parte, pentru o anizotropie mare a eforturilor, poate exista o divergență limitată a fracturilor în care anizotropia eforturilor compensează efectul de întoarcere a fracturilor datorită urmăririi eforturilor, și fractura poate fi forțată să meargă într-o direcție a efortului maxim. Indiferent de valoarea divergenței fracturilor, urmărirea eforturilor poate avea un efect asupra lățimii fracturilor, care poate afecta distribuția ratei de injectare în multiplele grupuri de perforații, și în ansamblu amprenta rețelei de fracturi și plasarea agentului de susținere.

[115] Figura 15 este o schemă bloc ilustrând o metodă 1500 pentru realizarea unei operații de fracturare în locația unui puț, cum ar fi locația de puț 100 din Figura 1.1. Locația de puț este poziționată în jurul unei formațiuni subterane având o gaură de foraj prin aceasta și o rețea de fracturi în aceasta. Rețeaua de fracturi are fracturi naturale, așa cum este prezentat în Figurile 1.1 și 1.2. Metoda (1500) poate implica (1580) realizarea unei operații de stimare prin stimularea locației puțului prin injectarea unui fluid de injectare cu agent de susținere în rețeaua de fracturi pentru a forma o rețea de fracturi hidraulice. În unele cazuri, stimularea poate fi realizată în locația puțului sau prin simulare.

[116] Metoda implică obținerea datelor despre locația puțului (1582) și a unui model de pământ mecanic al formațiunii subterane. Datele despre locația puțului pot include orice date despre locația puțului care pot fi utile pentru simulare, cum ar fi parametrii fracturilor naturale, imagini ale rețelei de fracturi, etc. Parametrii fracturilor naturale pot include, spre exemplu, orientarea densităților, distribuția și proprietățile mecanice (de exemplu, coeficienții de frecare, coeziune, tenacitatea fracturilor, etc.). Parametrii fracturilor pot fi obținuți din observații directe ale diagrafiilor ce formează imaginile găurii de foraj, estimate din datele seismice 3D, algoritmul colonie de furnici, anizotropia undelor sonice, curbura straturilor geologice, evenimente microseismice sau imagini, etc. Exemple de tehnici pentru obținerea parametrilor fracturilor sunt furnizate în PCT/US2012/48871 și US2008/0183451, al căror întreg conținut este incorporat aici prin citare.

[117] Imaginile pot fi obținute. Spre exemplu, prin observarea diagrafiilor cu imagini ale găurii de foraj, estimarea dimensiunilor fracturilor din măsurători ale găurii de foraj, obținerea de imagini micro-seismice și/sau asemenea. Dimensiunile fracturilor pot fi estimate prin evaluarea măsurătorilor seismice, urmărirea mușuroaielor, măsurători sonice, măsurători geologice și/sau asemenea. Alte date despre locația puțului pot fi generate de asemenea din diverse surse, cum ar fi măsurători în locația puțului, date istorice, prezumții, etc. Aceste date pot implica, spre exemplu, finalizarea, structura geologică, petrofizică, geomecanică, măsurători de foraj și alte forme de date. Modelul de pământ mecanic poate fi obținut utilizând tehnici convenționale.

[118] Metoda (1500) implică de asemenea generarea (1584) unui model de dezvoltare a fracturilor hidraulice în timp, cum ar fi în timpul operațiunii de stimulare.

Figurile 16.1-16.4 ilustrează un exemplu de generare (1584) a modelului de dezvoltare a fracturilor hidraulice. Așa cum este prezentat în Figura 16.1, în starea sa inițială, o rețea de fracturi 1606.1 cu fracturile naturale 1623 este poziționată în jurul unei formațiuni subterane 1602 cu o gaură de foraj 1604 prin ea. Pe măsură ce este injectat agent de susținere în formațiunea subterană 1602 din gaura de foraj 1604, presiunea de la agentul de susținere creează fracturile hidraulice 1691 în jurul găurii de foraj 1604. Fracturile hidraulice 1691 se extind în formațiunea subterană de-a lungul L_1 și L_2 (Figura 16.2), și întâlnesc alte fracturi din rețeaua de fracturi 1606.1 în timp, așa cum este indicat în Figurile 16.2-16.3. Punctele de contact cu celelalte fracturi sunt intersecțiile 1625.

[119] Generarea (1584) poate implica extinderea (1586) fracturilor hidraulice din gaura de foraj și în rețeaua de fracturi a formațiunii subterane pentru a forma o rețea de fracturi hidraulice incluzând fracturile naturale și fracturile hidraulice, așa cum este prezentat în Figura 16.2. Modelul de dezvoltare a fracturilor este bazat pe parametrii fracturilor naturale și un efort minim și un efort maxim pe formațiunea subterană. Generarea poate implica de asemenea determinarea (1588) parametrilor fracturilor hidraulice (de exemplu, presiunea p , lățimea w , debitul de curgere q , etc.), determinarea (1590) parametrilor de transport pentru agentul de susținere ce trece prin rețeaua de fracturi hidraulice și determinarea (1592) dimensiunilor fracturilor (de exemplu, înălțimea) fracturilor hidraulice, de exemplu, din parametrii determinați ai fracturilor hidraulice, parametrii de transport determinați și modelul de pământ mecanic. Parametrii fracturilor hidraulice pot fi determinați după extindere. Determinarea (1592) poate fi realizată de asemenea din parametrii de transport ai agentului de susținere, parametrii locației puțului și alte elemente.

[120] Generarea (1584) poate implica modelarea proprietăților rocii pe baza unui model de pământ mecanic, așa cum este descris, spre exemplu în *Koutsabeloulis și Zhang, 3D Reservoir Geomechanics Modeling in Oil/Gas Field Production, SPE Paper 126095, 2009 SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition ținută în Al Khobar, Arabia Saudită, 9-11 Mai, 2009*. Generarea poate implica de asemenea modelarea operației de fracturare prin utilizarea datelor despre locația puțului, parametrii de fracturare și/sau imagini drept intrări ale software-ului de modelare, cum ar fi UFM, pentru a genera imagini succesive ale fracturilor induse hidraulic în rețeaua de fracturi.

[121] Metoda (1500) implică de asemenea realizarea (1594) urmăririi eforturilor

pe fracturile hidraulice pentru a determina interferența eforturilor între fracturile hidraulice (sau cu alte fracturi), și repetarea (1598) generării (1584) pe baza urmării eforturilor și/sau interferența eforturilor determinată între fracturile hidraulice. Repetarea poate fi realizată pentru a ține cont de interferența fracturilor care poate afecta dezvoltarea fracturilor. Urmărirea eforturilor poate implica realizarea, spre exemplu, a 2D sau 3D DDM pentru fiecare din fracturile hidraulice și actualizarea modelului de dezvoltare a fracturilor în timp. Modelul de dezvoltare a fracturilor se poate propaga normal pe o direcție a efortului principal conform urmării eforturilor. Modelul de dezvoltare a fracturilor poate implica influențe ale fracturilor naturale și hidraulice asupra rețelei de fracturi (vezi Fig. 16.3).

[122] Urmărirea eforturilor poate fi realizată pentru mai multe găuri de foraj ale locației puțului. Urmărirea eforturilor din diversele găuri de foraj poate fi combinată pentru determinarea interacțiunii fracturilor așa cum este determinat din fiecare din găurile de foraj. Generarea poate fi repetată pentru fiecare din urmărirea de eforturi realizate pentru una sau mai multe dintre multiplele găuri de foraj. Generarea poate fi repetată de asemenea pentru urmărirea eforturilor realizată acolo unde stimularea este prevăzută din mai multe găuri de foraj. Multiple stimulări pot fi de asemenea realizate pe aceeași gaură de foraj cu diverse combinații de date, și comparate așa cum se dorește. Date de istoric sau alte date pot fi de asemenea introduse în generare pentru a asigura mai multe surse de informații pentru a fi luate în considerare în rezultatele finale.

[123] Metoda implică de asemenea determinarea (1596) comportamentul de intersecție între fracturile hidraulice și o fractură întâlnită, dacă fractura hidraulică întâlnește altă fractură, și repetarea (1598) generării (1584) pe baza comportamentul de intersecție, dacă fractura hidraulică întâlnește o fractură (vezi, de exemplu, Figura 16.3). Comportamentul de intersecție poate fi determinat utilizând, spre exemplu, tehnicile din PCT/US2012/059774, al cărei întreg conținut este incorporat aici prin citare.

[124] Determinarea comportamentului de intersecție poate implica realizarea urmării eforturilor. În funcție de condițiile din gaura forată, modelul de dezvoltare a fracturilor poate fi nemodificat sau modificat când fractura hidraulică întâlnește fractura. Când o presiune a fracturii este mai mare decât un efort ce acționează asupra fracturii întâlnite, modelul de dezvoltare a fracturilor se poate propaga de-a lungul fracturii întâlnite. Modelul de dezvoltare a fracturilor își poate continua propagarea de-a lungul

fracturii întâlnite până când este atins capătul fracturii naturale. Modelul de dezvoltare a fracturilor își poate modifica direcția la capătul fracturii naturale, cu modelul de dezvoltare a fracturilor extinzându-se într-o direcție normală pe un efort minim la capătul fracturii naturale, așa cum este prezentat în Figura 16.4. Așa cum este prezentat în Figura 16.4, fractura hidrolică se extinde pe un nou traseu 1627 conform eforturilor locale σ_1 și σ_2 .

[125] Opțional, metoda (1500) poate implica validarea (1599) modelului de dezvoltare a fracturilor. Validarea poate fi realizată prin compararea modelului de dezvoltare rezultat cu alte date, cum ar fi imagini micro-seismice, așa cum este prezentat spre exemplu în Figurile 7.1 și 7.2.

[126] Metoda poate fi realizată în orice ordine și repetată așa cum se dorește. Spre exemplu, generarea (1584) - (1599) poate fi repetată în timp, spre exemplu, prin iterații când rețeaua de fracturi se modifică. Generarea (1584) poate fi realizată pentru actualizarea simulării iterate realizată în timpul generării pentru a ține cont de interacțiunea și efectele multiplelor fracturi, atunci când rețeaua de fracturi este stimulată în timp.

[127] Metoda 1500 poate fi utilizată pentru o varietate de condiții ale locației de puț având perforații și fracturi, cum ar fi fracturile 811.1-811.3, așa cum este ilustrat în Figura 8. În exemplul din Figura 8, fracturile 811.1-811.3 pot fi poziționate aproximativ la aceeași adâncime în formațiune. În unele cazuri, fracturile pot fi adâncimi diferite, așa cum este prezentat, spre exemplu, în Figurile 18-20.

[128] Figurile 18-20 prezintă diverse exemple de transpuneri schematice 1800, 1900, 2000 ale fracturilor transversale paralele 1811.1, 1811.2 ce se propagă simultan din mai multe grupuri de perforații 1815.1, 1815.2, respectiv, în jurul unei găuri de foraj înclinată 1804 din formațiunea 1802. Fiecare dintre fracturile 1811.1, 1811.2 traversează straturile 1817.1, 1817.2, 1817.3, 1817.4, 1817.5, 1817.6 la diferite adâncimi D1-D6, respectiv, de-a lungul formațiunii 1802. Formațiunea 1802 poate avea unul sau mai multe straturi cu constituirii diverse, cum ar fi șist, nisip, rocă, etc. Formațiunea 1802 are un efort total σ_f și fiecare din straturile 1817.1-1817.6 are un efort corespondent σ_{f1} - σ_{f6} , respectiv.

[129] Figurile 18 și 19 pot fi generate utilizând urmărirea eforturilor, așa cum a fost descris mai sus. În exemplul din Figura 18, fractura 1811.1 se extinde prin straturile

1817.2-1817.4 și fractura 1811.2 se extinde prin straturile 1817.3-1817.5. În exemplul din Figura 19, fractura 1811.2' se extinde prin straturile 1817.2-1817.5. Așa cum este prezentat în Figura 19, fracturile pot avea o lungime verticală dată și se pot extinde la o distanță dată prin unul sau mai multe straturi și recepționează efectele eforturilor corespondente de la acestea.

[130] În exemplul din Fig. 19, fracturile 1811.1, 1811.2' sunt luate fără a considera efectele urmăririi eforturilor. În acest caz, creșterea de înălțime a fracturilor 1811.1 și 1811.2' este influențată de distribuția verticală a eforturilor *in-situ* a eforturilor *of* ale straturile corespondente din jurul fracturilor. Fractura 1811.1 are o lungime verticală L1 deasupra grupului de perforații 1815.1 și o lungime verticală L2 dedesubtul grupului de perforații 1815.1. Fractura 1811.2' are o lungime verticală L3 deasupra grupului de perforații 1815.2 și o lungime verticală L4 dedesubtul grupului de perforații 1815.2.

[131] Figura 20 poate fi generată de urmărirea eforturilor utilizând 3D DDM, așa cum a fost descris mai sus. În exemplul din Figura 20, fractura 1811.1' se extinde prin straturile 1817.1-1817.4 și fractura 1811.2" se extinde prin straturile 1817.3-1817.6. Fig. 20 prezintă o secțiune transversală a fracturilor din Figura 19 odată ce este luat în considerare efectul urmăririi eforturilor verticale. Fractura 1811.1 se dezvoltă mai mult în sus și fractura 1811.2 se dezvoltă mai mult în jos, datorită urmăririi eforturilor.

[132] În acest caz, creșterea înălțimii fracturilor este influențată de distribuția verticală a eforturilor *in-situ* plus urmărirea de eforturi a fracturilor adiacente. Fractura 1811.1' are o lungime verticală extinsă L1' deasupra grupului de perforații 1815.1 și o lungime verticală redusă L2' dedesubtul grupului de perforații 1815.1. Fractura 1811.2" are o lungime verticală redusă L3' deasupra grupului de perforații 1815.2 și o lungime verticală extinsă L4' dedesubtul grupului de perforații 1815.2. Creșterea prezentată în Figura 20 reflectă creșterea divergentă datorată interacțiunii fracturilor, așa cum este reprezentat schematic prin săgețile din Figura 18.

[133] La fel ca în Figurile 19-20, unde fracturile se află la adâncimi diferite și sunt supuse la eforturi diferite, creșterea înălțimii fracturilor poate varia în funcție de înălțimea relativă a fracturii. Fracturile sunt inițiate din formațiuni diferite, și prezența fracturii adiacente poate ajuta la prevenirea unei fracturi să se dezvolte în stratul din formațiunile geologice ocupate de altă fractură datorită efectului de urmărire a eforturilor verticale.

[134] Efectul de urmărire a eforturilor descris în cadrul de față poate lua în

considerare interacțiunea dintre fracturi aflate la aceeași sau la înălțimi diferite. Spre exemplu în Figura 8, fractura mediană poate fi comprimată de fracturile de pe fiecare parte a acesteia și poate deveni mai mică și mai îngustă, așa cum este descris în legătură cu Figura 10. Modelul UFM prevăzut în cadrul de față poate fi utilizat pentru a descrie această interacțiune. În alt exemplu, așa cum este prezentat în Figurile 18-20, cele două fracturi se pot comprima una pe cealaltă și pot depărta fracturile. În acest exemplu, fractura 1811.1 se extinde în sus și fractura din dreapta se dezvoltă în jos datorită înclinării găurii de foraj.

[135] Figura 21 ilustrează o altă versiune a metodei 2100 care poate lua în considerare efectele fracturilor la diverse adâncimi. Metoda 2100 poate lua în considerare interferența eforturilor dintre fracturile hidraulice pentru a evalua creșterea de înălțime a fiecărei fracturi, indiferent dacă la aceeași sau la înălțimi diferite. Metoda 2100 poate fi utilizată pentru a realiza o operație de fracturare într-o locație de puț având o gaură de foraj cu o rețea de fracturi în jurul acesteia, așa cum este prezentat, spre exemplu, în Figurile 18-20. În această versiune, metoda 2100 poate fi realizată conform unei părți a sau întregii metode 1500, așa cum a fost descris în legătură cu Figura 15, cu excepția unei urmăririi suplimentare a eforturilor 2195, o determinare modificată 1596' și o repetare modificată 1598'.

[136] Urmărirea suplimentară a eforturilor 2195 poate fi realizată pe baza dezvoltării verticale a fracturilor hidraulice pentru a lua în considerare efectele fracturilor hidraulice la diferite adâncimi. Urmărirea suplimentară a eforturilor 2195 poate fi realizată utilizând metoda 3D DDM când fracturile se află la adâncimi diferite (vezi, de exemplu, Fig. 18-20). Urmărirea suplimentară a eforturilor 2195 poate fi realizată după realizarea 1594 și înainte de determinarea modificată 1596'. În unele cazuri, urmărirea suplimentară a eforturilor 2195 poate fi realizată simultan cu realizarea urmăririi eforturilor 1594. Spre exemplu, atunci când realizarea 1594 este realizată utilizând metoda 3D DDM, adâncimea poate fi luată în considerare fără urmărirea suplimentară a eforturilor 2195. În unele cazuri, realizarea 1594 poate fi realizată utilizând altă tehnică, cum ar fi metoda 2D DDM, și adâncimea fracturilor poate fi luată în considerare cu urmărirea suplimentară a eforturilor 2195 utilizând metoda 3D DDM. Metoda 3D DDM poate lua în considerare influența fracturilor adiacente și a eforturilor verticale asociate, și poate genera o dezvoltare și/sau lungime verticală ajustate.

[137] Determinarea 1596' și repetarea 1598' pot fi modificate pentru a lua în considerare urmărirea suplimentară a eforturilor 2195, dacă este realizată. Determinarea modificată 1596' implică determinarea comportamentului de intersecție între fractura hidrolică și fractura întâlnită pe baza realizării 1594 și urmării suplimentare a eforturilor 2195. Repetarea modificată 1598' implică repetarea modelului de dezvoltare a fracturilor pe baza determinării 1594 interferenței eforturilor, urmărirea suplimentară a eforturilor 2195 și determinarea comportamentului de intersecție 1596'.

[138] O ajustare adițională 2197 poate fi realizată pe baza urmării eforturilor 1594 și/sau 2195. Spre exemplu, dezvoltarea fracturii poate fi compensată prin ajustarea a cel puțin unui parametru de stimulare, cum ar fi presiunile de pompare, viscozitatea fluidului, etc. în timpul injectării (sau fracturării). Dezvoltarea fracturii poate fi simulată utilizând modelul UFM modificat pentru parametri de pompare ajustați.

[139] Una sau mai multe porțiuni ale metodei, cum ar fi realizarea operației de stimulare 1580 pot fi repetate pe baza unei părți sau a tuturor operațiilor 1594-1599. Spre exemplu, pe baza urmării efortului 1594 și/sau 2195 și/sau a dezvoltării rezultate a fracturii, stimularea poate fi ajustată pentru a obține dezvoltarea dorită a fracturii (vezi, de exemplu, Figura 20). Stimularea poate fi modificată, spre exemplu, prin ajustarea presiunilor de pompare, viscozităților și/sau altor parametri de injectare pentru a obține operarea dorită în locația puțului și/sau dezvoltarea dorită a fracturii.

[140] Diverse combinații ale unei părți sau toate dintre metodele din Figurile 15 și/sau 21 pot fi realizate în diverse ordini.

[141] Deși prezenta invenție a fost descrisă cu referire la exemplele ilustrative de realizare și implementări ale acesteia, prezenta invenție nu este limitată de sau la aceste exemple ilustrative de realizare și/sau implementări. În schimb, sistemele și metodele conform prezentei invenții sunt susceptibile de diverse modificări, variații și/sau îmbunătățiri fără a ne îndepărta de spiritul sau scopul prezentei invenții. În consecință, prezenta invenție înglobează în mod expres toate aceste modificări, variații și îmbunătățiri în interiorul scopului său.

[142] Ar trebui notat că în dezvoltarea oricărui astfel de exemplu de realizare actual, sau numeroase implementări, decizii specifice pot fi luate pentru a atinge obiectivele specifice dezvoltatorului, cum ar fi corespondența cu sistemul asociat și constrângerile legate de afacere, care vor varia de la o implementare la alta. Mai mult,

va fi apreciat că un astfel de efort de dezvoltare ar putea fi complex și consumator de timp însă fără îndoială va fi o sarcină de rutină efectuată de cei cu pregătire medie în domeniu care au beneficiat de această dezvoltare. În plus, exemplele de realizare utilizate/dezvăluite aici pot include de asemenea unele componente, altele decât cele menționate aici.

[143] În descriere, fiecare valoare numerică trebuie citită o dată ca fiind modificată de termenul „aproximativ” (dacă nu este deja expres modificată astfel), și apoi citită din nou ca nefiind modificată decât dacă este indicat altfel în context. De asemenea, în descriere, ar trebui înțeles că orice interval listat sau descris ca fiind util, adecvat sau asemenea, se intenționează ca valorile din interiorul intervalului, incluzând punctele de capăt, să fie considerate ca fiind menționate. Spre exemplu, „un interval de la 1 la 10” trebuie citit ca indicând posibile numere în mod continuu între aproximativ 1 și aproximativ 10. Astfel, chiar dacă punctele de date specifice din interiorul intervalului, sau chiar nici un punct de date din interval, sunt identificate explicit sau se face referire ca câteva specifice, trebuie înțeles că inventatorii apreciază și înțeleg că oricare și toate punctele de date din interiorul intervalului trebuie considerate ca fiind specificate, și că inventatorii prezintă cunoștințe despre întregul interval și toate punctele din interiorul intervalului.

[144] Declarațiile făcute în cadrul de față asigură doar informații referitoare la prezenta invenție și nu pot constitui stadiul tehnicii, și pot descrie unele exemple de realizare ilustrând invenția. Toate referințele citate aici sunt încorporate prin citare în prezenta aplicație în totalitatea lor.

[145] Deși câteva exemple ilustrative de realizare au fost descrise în detaliu, persoanele de specialitate în domeniu vor aprecia facil că multe modificări sunt posibile în exemplele ilustrative de realizare fără a ne îndepărta material de sistemul și metoda pentru realizarea operațiunilor de stimulare a găurii de foraj. În consecință, toate aceste modificări sunt destinate să fie incluse în interiorul scopului acestei invenții așa cum este definită în următoarele revendicări. În revendicări, propozițiile mijloc plus funcție sunt destinate să acopere structurile descrise în cadrul de față ca realizând funcția menționată și un echivalent structural și structuri echivalente. Astfel, deși un cui și un șurub pot să nu fie echivalente structural prin aceea că cuiul utilizează o suprafață cilindrică pentru securizarea împreună a pieselor din lemn, în timp ce un șurub utilizează

o suprafață elicoidală, în mediul fixării pieselor de lemn, un cui și un șurub pot fi structuri echivalente. Intenția expresă a solicitantului este de a nu invoca 35 U.S.C. § 112, paragraf 6 pentru orice limitări ale revendicărilor de aici, cu excepția pentru cele în care revendicarea utilizează în mod expres cuvintele „mijloace pentru” împreună cu o funcție asociată.



REVENDICĂRI

1. Metodă de realizare a unei operațiuni de fracturare într-o locație de puț, locația de puț fiind poziționată în jurul unei formațiuni subterane având o gaură de foraj prin ea și o rețea de fracturi în aceasta, rețeaua de fracturi cuprinzând fracturi naturale, locația de puț fiind stimulată prin injectarea unui fluid de injectare cu agent de susținere în interiorul rețelei de fracturi, metoda cuprinzând:

- obținerea datelor despre locația de puț cuprinzând parametrii fracturilor naturale și obținerea unui model de pământ mecanic al formațiunii subterane;

- generarea unui model de dezvoltare a fracturilor hidraulice pentru rețeaua de fracturi în timp, generarea cuprinzând:

- extinderea fracturilor hidraulice din gaura de foraj și în interiorul rețelei de fracturi a formațiunii subterane pentru a forma o rețea de fracturi hidraulice cuprinzând fracturile naturale și fracturile hidraulice;

- determinarea parametrilor fracturilor hidraulice după extindere;

- determinarea parametrilor de transport pentru agentul de susținere ce trece prin rețeaua de fracturi hidraulice; și

- determinarea dimensiunilor fracturilor hidraulice din parametrii determinați ai fracturilor hidraulice, parametrii de transport determinați și modelul de pământ mecanic; și

- realizarea urmăririi eforturilor pe fracturile hidraulice pentru a determina interferența de eforturi între fracturile hidraulice la diferite adâncimi; și

- repetarea generării pe baza interferenței de eforturi determinată.

2. Metodă conform revendicării 1, în care realizarea urmăririi eforturilor cuprinde realizarea unei metode de discontinuitate a deplasării tridimensionale.

3. Metodă conform revendicării 1, în care realizarea urmăririi eforturilor cuprinde realizarea unei prime urmăriri a eforturilor pentru a determina interferența între fracturile hidraulice și realizarea unei a doua urmăriri pentru a determina interferența între fracturile hidraulice la diferite adâncimi.

4. Metodă conform revendicării 1, în care realizarea urmăririi eforturilor cuprinde realizarea unei metode de discontinuitate a deplasării bidimensionale și realizarea unei metode de discontinuitate a deplasării tridimensionale.

5. Metodă conform revendicării 1, cuprinzând suplimentar, dacă fracturile hidraulice întâlnesc o altă fractură, determinarea comportamentului de intersectare la nivelul acelei alte fracturi întâlnite, și în care repetarea cuprinde repetarea generării pe baza interferenței de eforturi determinate și a comportamentului de intersectare.

6. Metodă conform revendicării 5, în care modelul de dezvoltare a fracturilor hidraulice este unul dintre cel influențat sau neinfluențat de comportamentul de intersectare.

7. Metodă conform revendicării 5, în care o presiune a fracturilor din rețeaua de fracturi hidraulice este mai mare decât un efort ce acționează asupra fracturii întâlnite și în care modelul de dezvoltare a fracturilor se propagă de-a lungul fracturii întâlnite.

8. Metodă conform revendicării 1, în care modelul de dezvoltare a fracturilor continuă să se propage de-a lungul fracturii întâlnite până când este atins un capăt al fracturii naturale.

9. Metodă conform revendicării 1, în care modelul de dezvoltare a fracturilor își modifică direcția la capătul fracturii naturale, modelul de dezvoltare a fracturilor extinzându-se într-o direcție normală pe un efort minim la capătul fracturii naturale.

10. Metodă conform revendicării 1, în care modelul de dezvoltare a fracturilor se propagă normal pe un efort principal local conform urmăririi eforturilor.

11. Metodă conform revendicării 1, în care urmărirea eforturilor cuprinde realizarea discontinuității deplasării pentru fiecare din fracturile hidraulice.

12. Metodă conform revendicării 1, în care urmărirea eforturilor cuprinde realizarea urmăririi eforturilor în jurul mai multor găuri de foraj dintr-o locație de puț și repetarea generării utilizând urmărirea eforturilor realizată pe multiplele găuri de foraj.

13. Metodă conform revendicării 1, în care urmărirea eforturilor cuprinde realizarea urmăririi eforturilor în mai multe etape de stimulare în gaura de foraj.

14. Metodă conform revendicării 1, cuprinzând suplimentar validarea modelului de dezvoltare a fracturilor prin compararea modelului de dezvoltare a fracturilor cu cel puțin o simulare de stimulare a rețelei de fracturi.

15. Metodă conform revendicării 1, în care extinderea cuprinde extinderea fracturilor hidraulice de-a lungul modelul de dezvoltare a fracturilor hidraulice pe baza parametrilor fracturilor naturale și un efort minim și un efort maxim pe formațiunea subterană.

16. Metodă conform revendicării 1, în care determinarea dimensiunilor fracturilor cuprinde una dintre evaluarea măsurătorilor seismice, algoritmul colonie de furnici, măsurători sonice, măsurători geologice și combinații ale acestora.

17. Metodă conform revendicării 1, în care datele despre locația de puț cuprind suplimentar cel puțin una din măsurători geologice, geofizice, geo-mecanice, diagrafi, extindere, istoric și combinații ale acestora.

18. Metodă conform revendicării 1, în care parametrii fracturilor naturale sunt generați de una din observarea diagrafiilor ce formează imaginea găurii de foraj, estimarea dimensiunilor fracturilor din măsurătorile găurii de foraj, obținerea imaginilor microseismice și combinații ale acestora.

19. Metodă de realizare a unei operații de fracturare într-o locație de puț, locația de puț fiind poziționată în jurul unei formațiuni subterane având o gaură de foraj prin ea și o rețea de fracturi în aceasta, rețeaua de fracturi cuprinzând fracturi naturale, locația

de puț fiind stimulată prin injectarea unui fluid de injectare cu agent de susținere în interiorul rețelei de fracturi, metoda cuprinzând:

- obținerea datelor despre locația de puț cuprinzând parametrii fracturilor naturale și obținerea unui model de pământ mecanic al formațiunii subterane;

- generarea unui model de dezvoltare a fracturilor hidraulice pentru rețeaua de fracturi în timp, generarea cuprinzând:

- extinderea fracturilor hidraulice din gaura de foraj și în interiorul rețelei de fracturi a formațiunii subterane pentru a forma o rețea de fracturi hidraulice cuprinzând fracturile naturale și fracturile hidraulice;

- determinarea parametrilor fracturilor hidraulice după extindere;

- determinarea parametrilor de transport pentru agentul de susținere ce trece prin rețeaua de fracturi hidraulice; și

- determinarea dimensiunilor fracturilor hidraulice din parametrii determinați ai fracturilor hidraulice, parametrii de transport determinați și modelul de pământ mecanic; și

- realizarea urmăririi eforturilor pe fracturile hidraulice pentru a determina interferența de eforturi între fracturile hidraulice;

- realizarea unei urmăririi suplimentare a eforturilor pe fracturile hidraulice pentru a determina interferența eforturilor între fracturile hidraulice la diferite adâncimi;

- dacă fractura hidraulică întâlnește o altă fractură, determinarea comportamentului de intersectare între fracturile hidraulice și o fractură întâlnită pe baza interferenței eforturilor determinată; și

- repetarea generării pe baza interferenței de eforturi determinată și comportamentului de intersectare.

20. Metodă conform revendicării 19, cuprinzând suplimentar validarea modelului de dezvoltare a fracturilor.

21. Metodă de realizare a unei operații de fracturare într-o locație de puț, locația de puț fiind poziționată în jurul unei formațiuni subterane având o gaură de foraj prin ea și o rețea de fracturi în aceasta, rețeaua de fracturi cuprinzând fracturi naturale, metoda cuprinzând:

- stimularea locației de puț prin injectarea unui fluid de injectare cu agent de susținere în interiorul rețelei de fracturi;
- obținerea datelor despre locația de puț cuprinzând parametrii fracturilor naturale și obținerea unui model de pământ mecanic al formațiunii subterane;
- generarea unui model de dezvoltare a fracturilor hidraulice pentru rețeaua de fracturi în timp, generarea cuprinzând:
 - extinderea fracturilor hidraulice din gaura de foraj și în interiorul rețelei de fracturi a formațiunii subterane pentru a forma o rețea de fracturi hidraulice cuprinzând fracturile naturale și fracturile hidraulice;
 - determinarea parametrilor fracturilor hidraulice după extindere;
 - determinarea parametrilor de transport pentru agentul de susținere ce trece prin rețeaua de fracturi hidraulice; și
 - determinarea dimensiunilor fracturilor hidraulice din parametrii determinați ai fracturilor hidraulice, parametrii de transport determinați și modelul de pământ mecanic; și
- realizarea urmăririi eforturilor pe fracturile hidraulice pentru a determina interferența de eforturi între fracturile hidraulice la diferite adâncimi;
- repetarea generării pe baza interferenței de eforturi determinată; și
- ajustarea stimulării pe baza urmăririi eforturilor.

22. Metodă conform revendicării 20, cuprinzând suplimentar validarea modelului de dezvoltare a fracturilor.

23. Metodă conform revendicării 20, cuprinzând suplimentar, dacă fractura hidrolică întâlnește altă fractură, determinarea comportamentului de intersecție între fracturile hidraulice și acea altă fractură întâlnită, și în care repetarea cuprinde generarea pe baza interferenței de eforturi determinată și a comportamentului de intersecție.

24. Metodă conform revendicării 21, în care ajustarea cuprinde modificarea cel puțin a unui parametru de stimulare cuprinzând rata de pompare și viscozitatea fluidului.

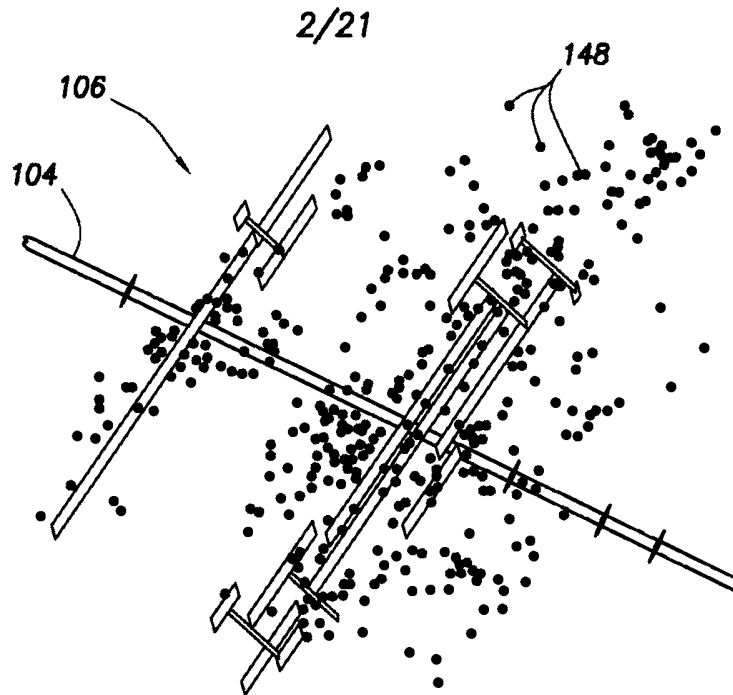


FIG. 1.2

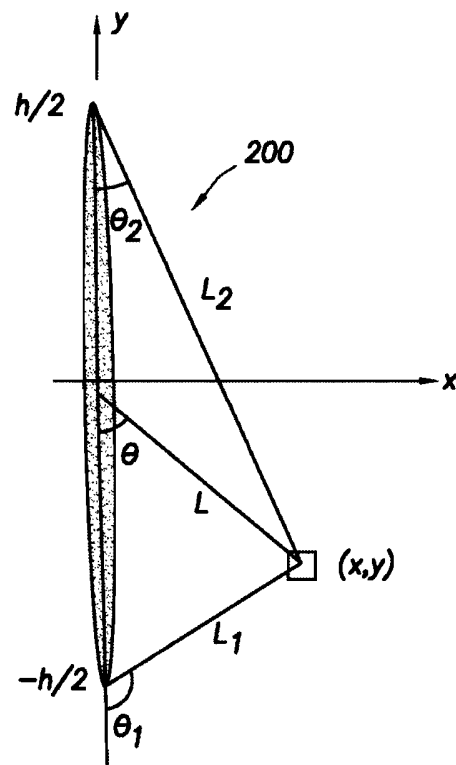


FIG. 2

3/21

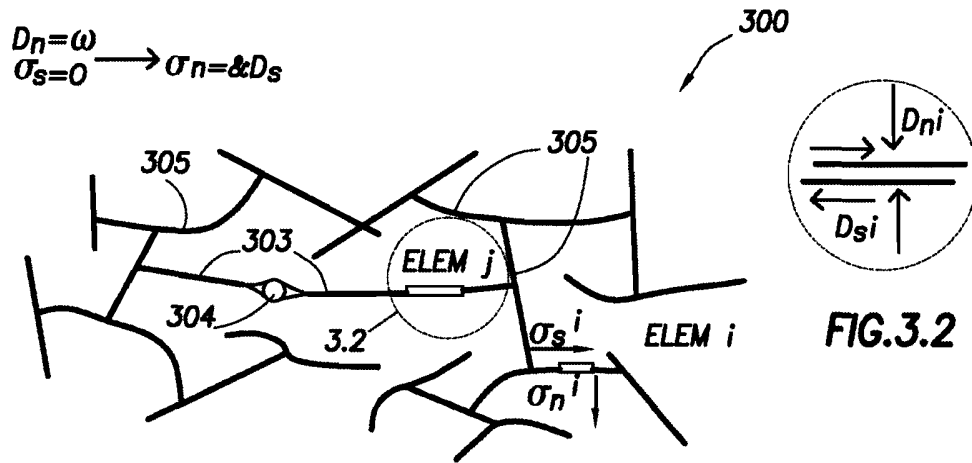
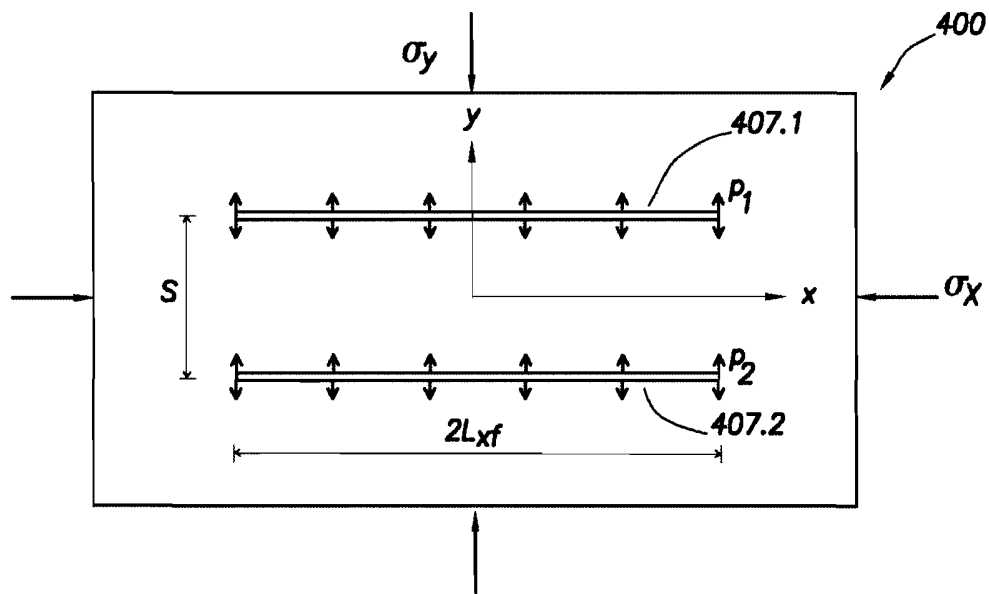


FIG. 3.2



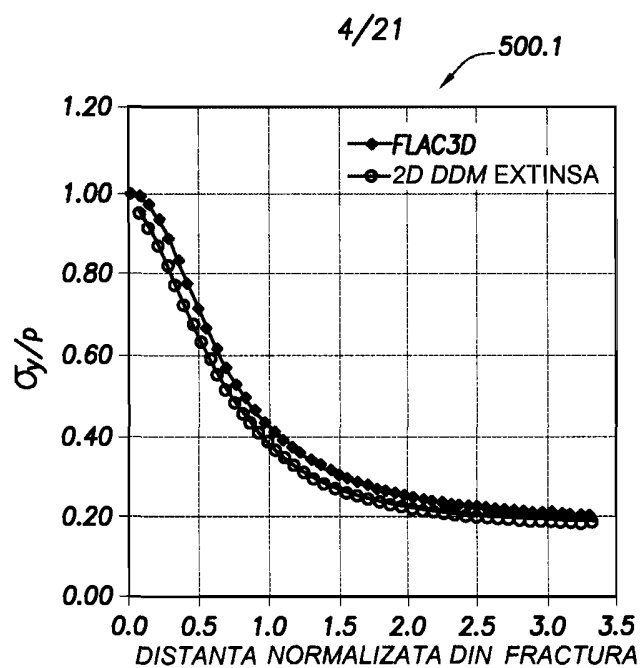


FIG.5.1

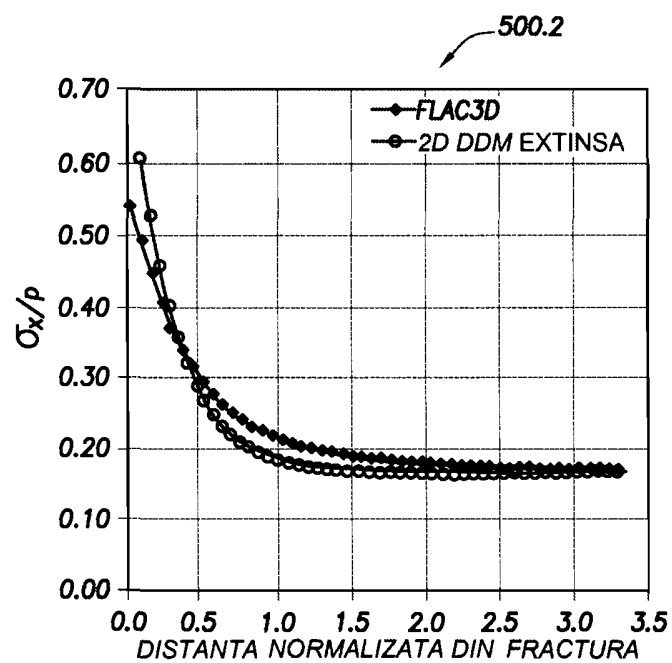


FIG.5.2

24

5/21

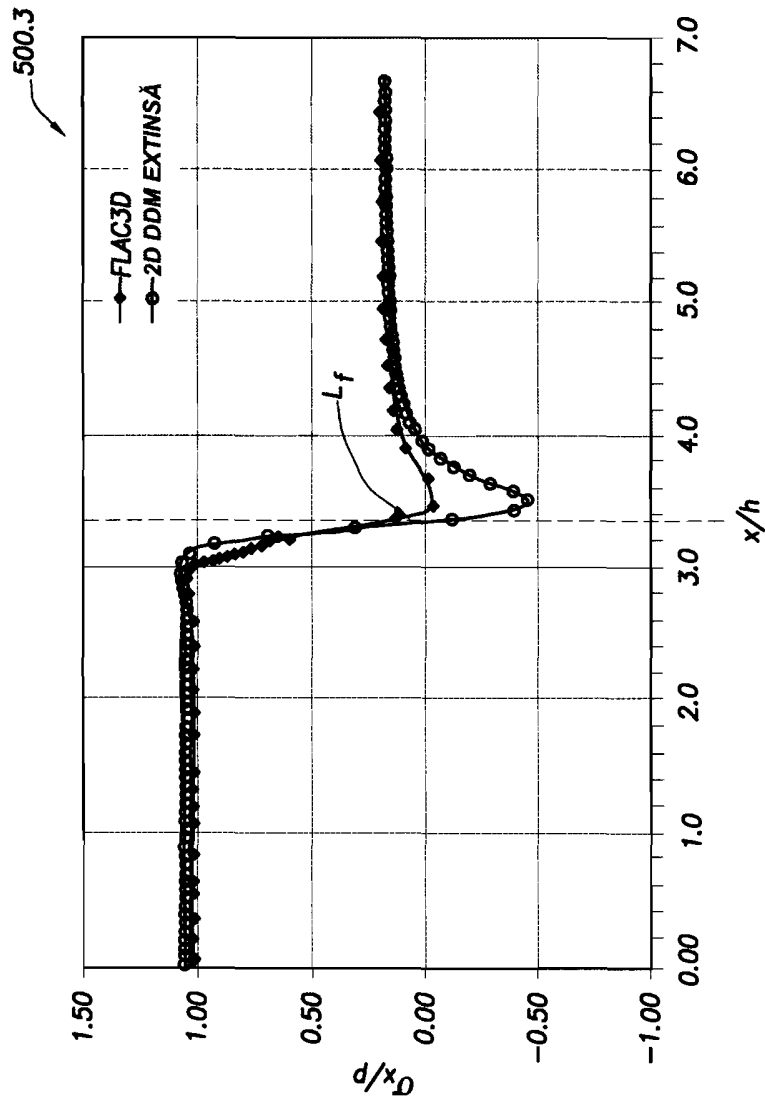


FIG.5.3



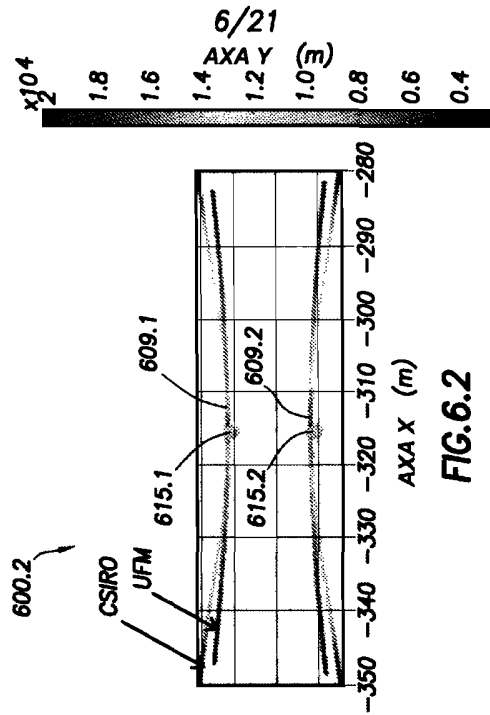


FIG. 6.2

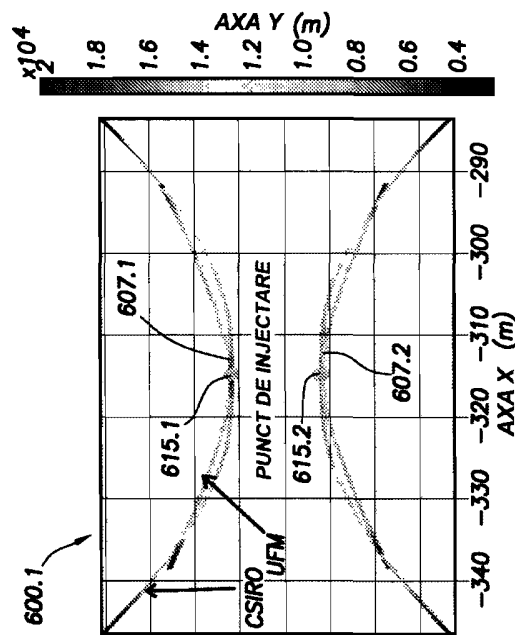


FIG. 6.1

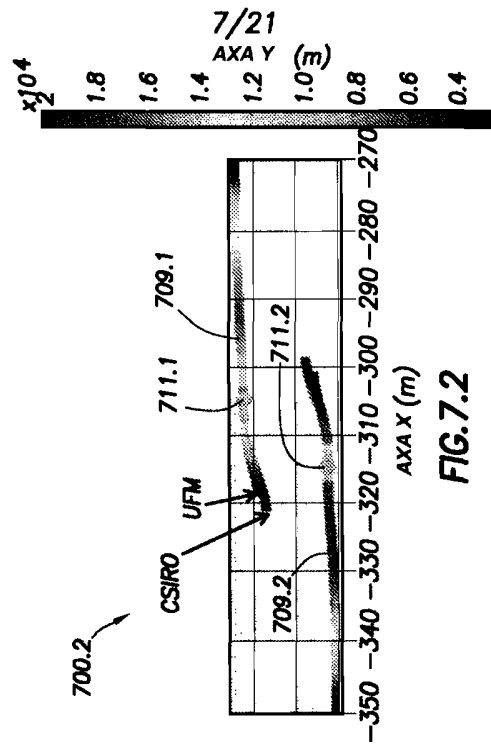


FIG. 7.2

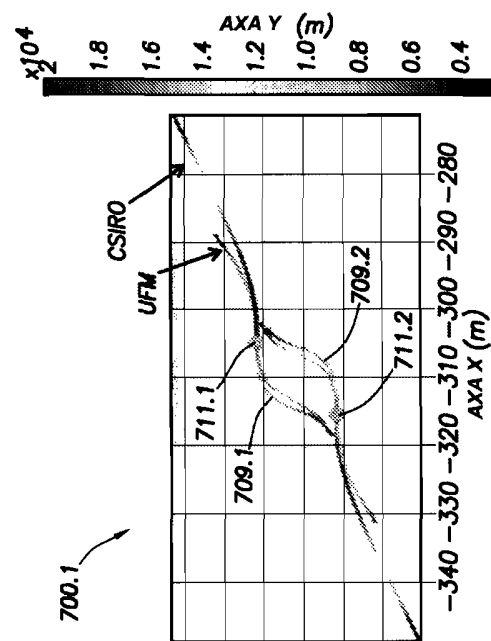


FIG. 7.1

8/21

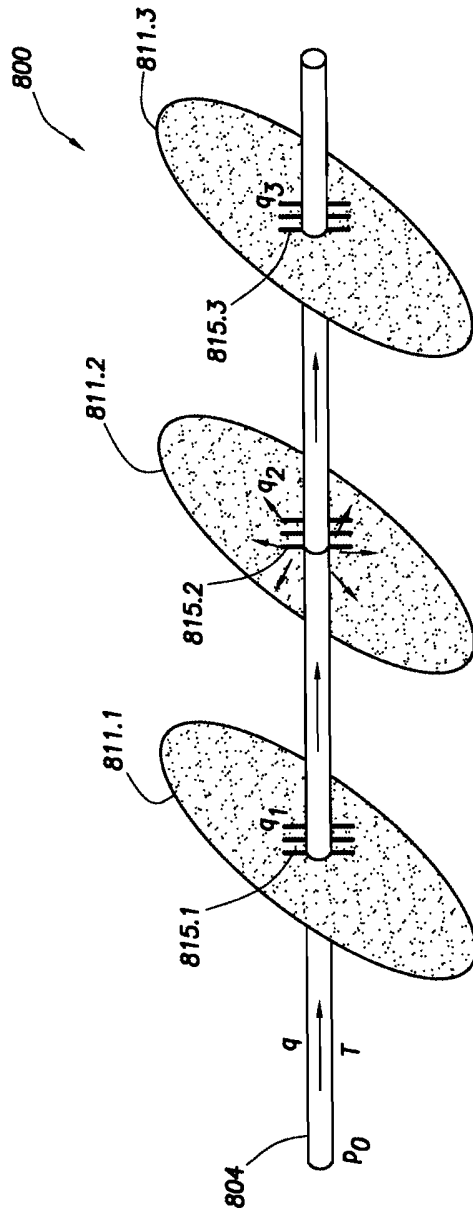


FIG. 8

9/21

900

— xf1(ft) 917.1
 - - - xf2 917.2
 — xf3 917.3
 - - - xf4 917.4
 - . - . - xf5 917.5
 — ◆ xf1(ft) 919.1
 — ● xf2 919.2
 — ▲ xf3 919.3
 — △ xf4 919.4
 - - - △ xf5 919.5

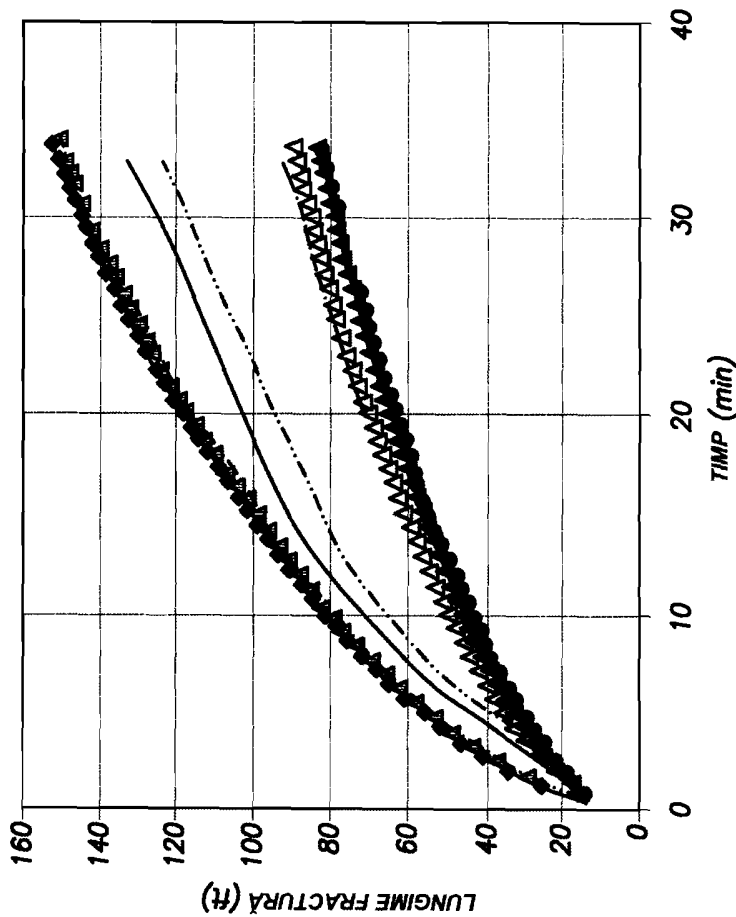


FIG.9



10/21

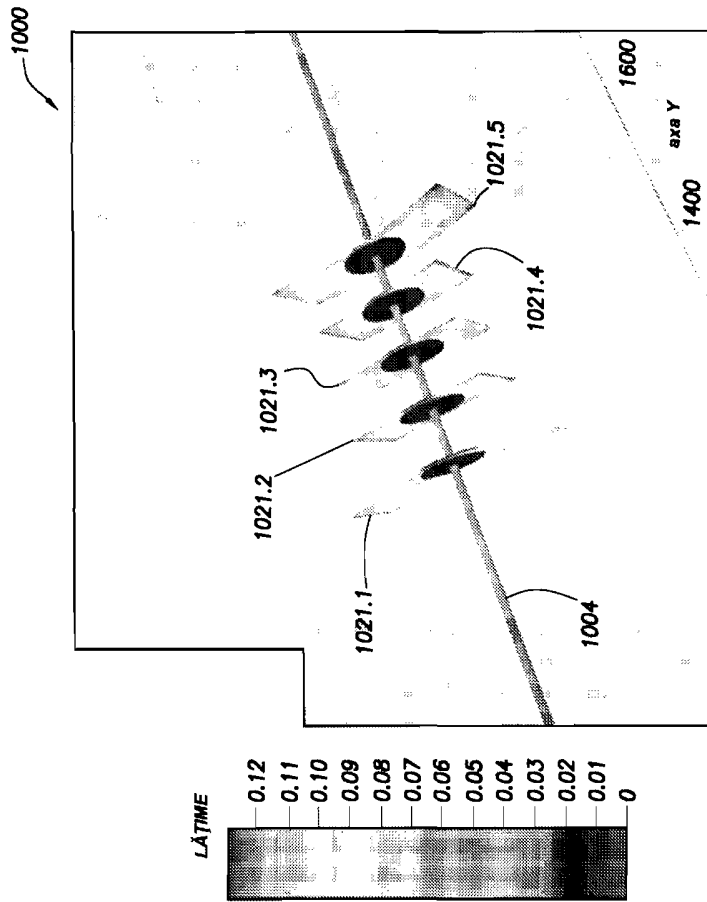


FIG. 10

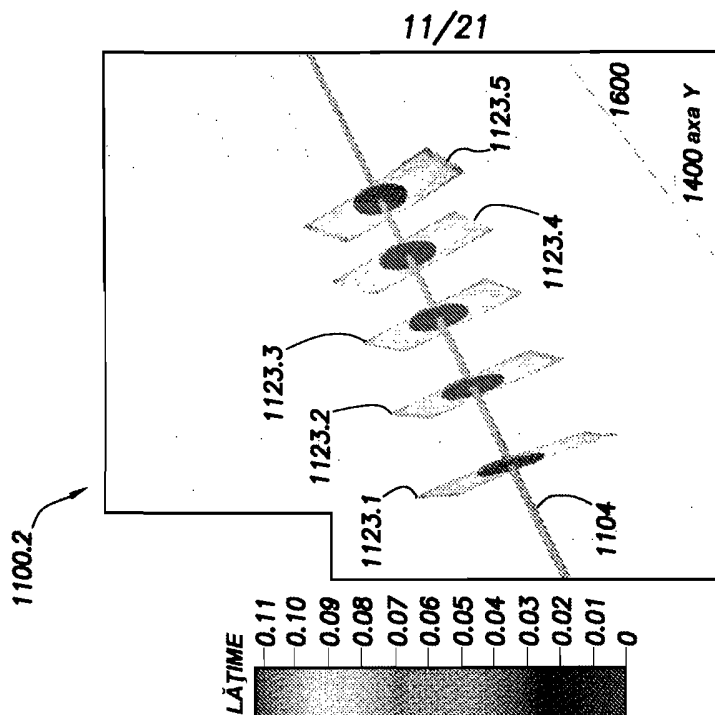


FIG.11.2

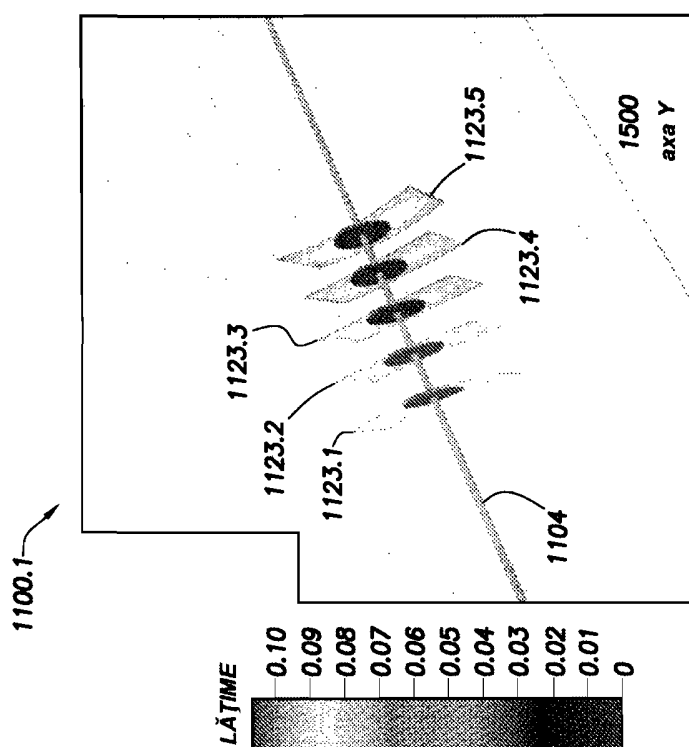


FIG.11.1

12/21

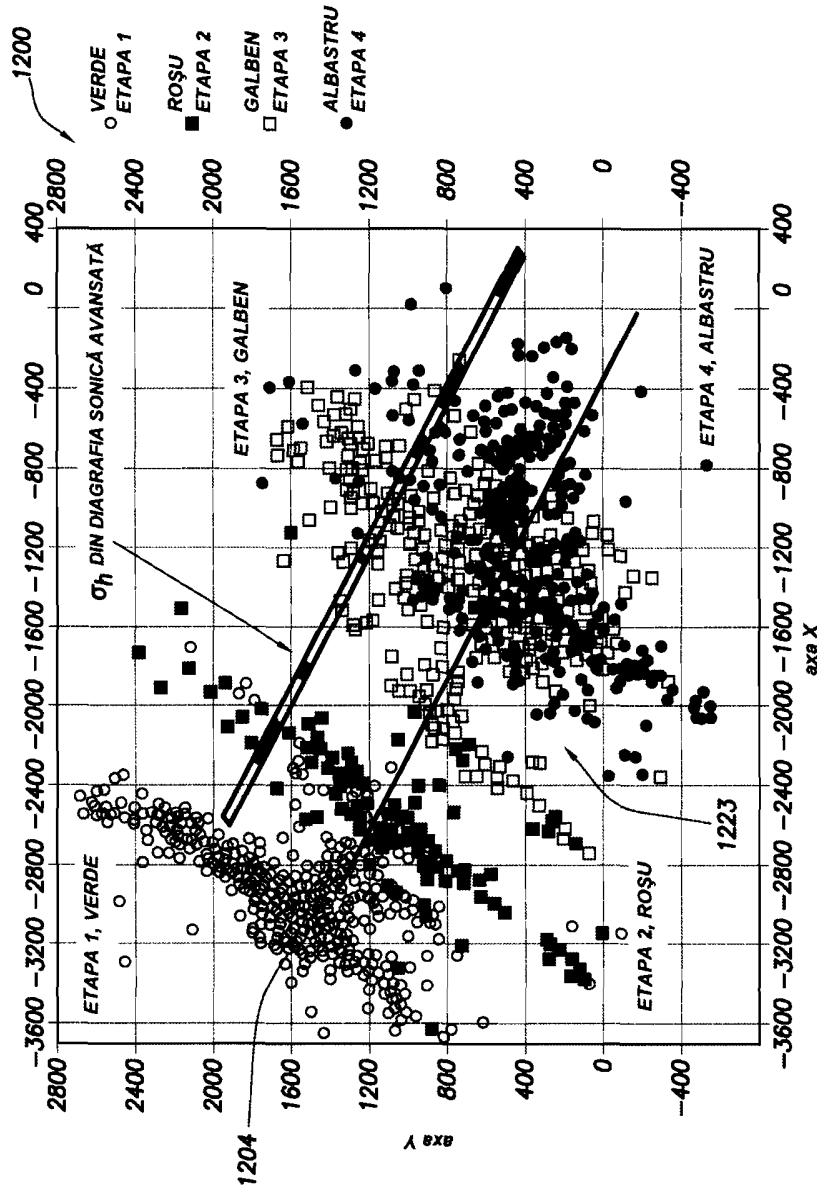


FIG.12

13/21

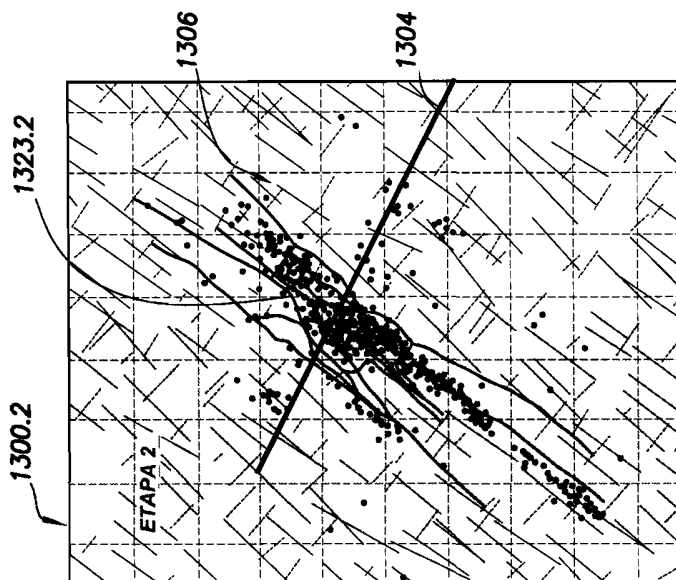


FIG. 13.2

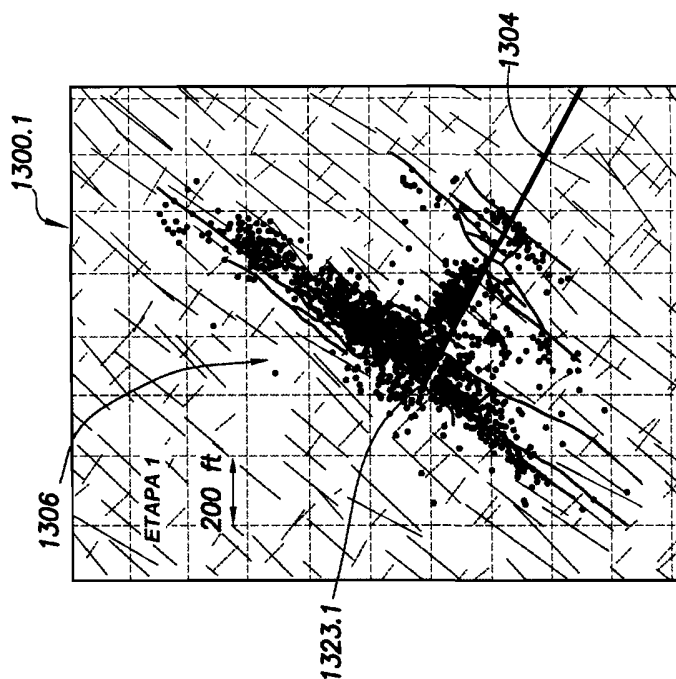


FIG. 13.1

14/21

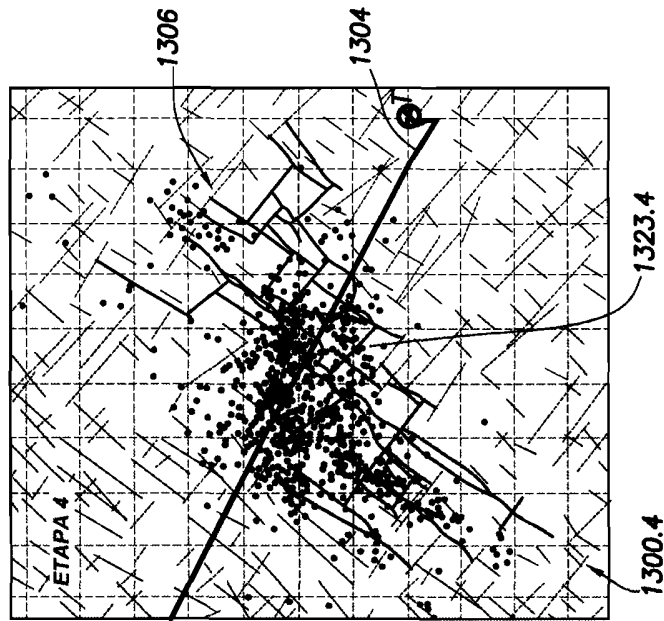


FIG. 13.4

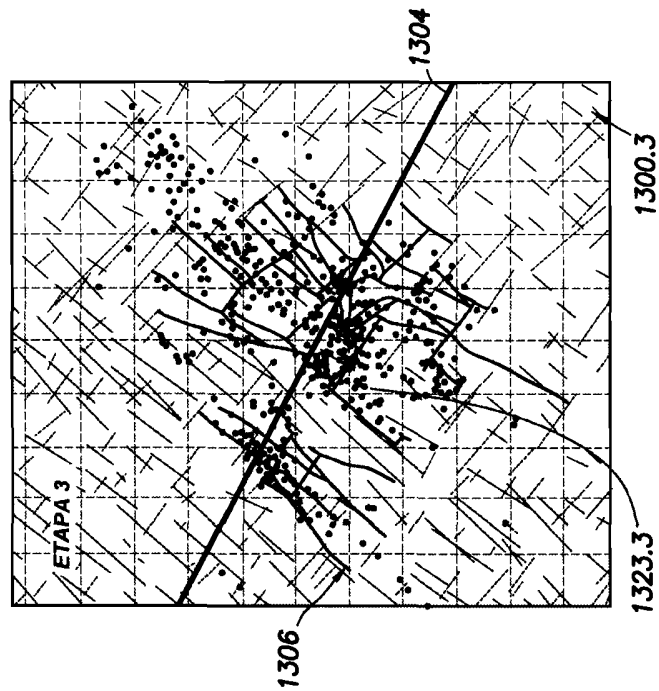


FIG. 13.3

15/21

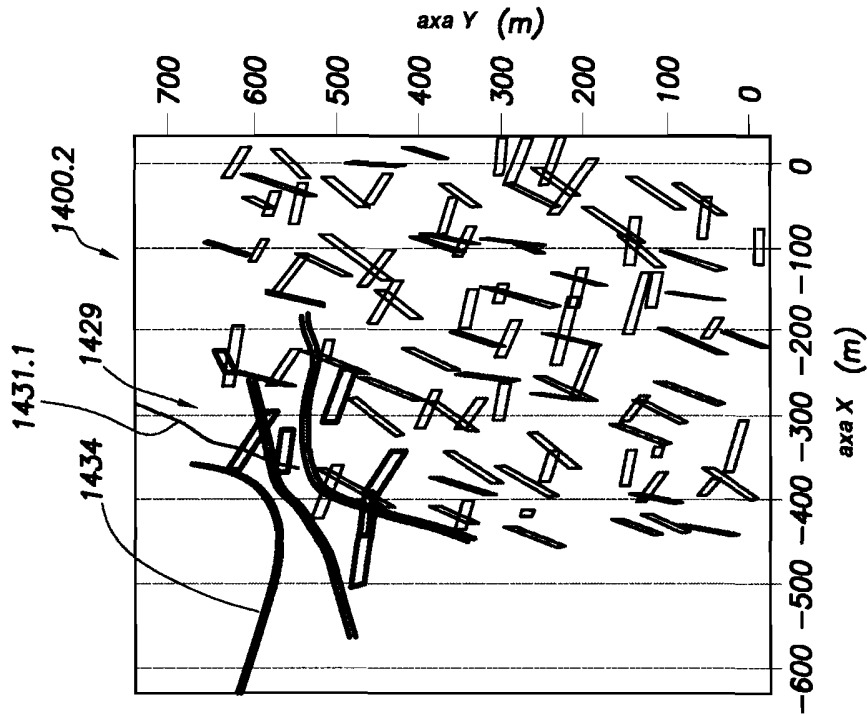


FIG. 14.2

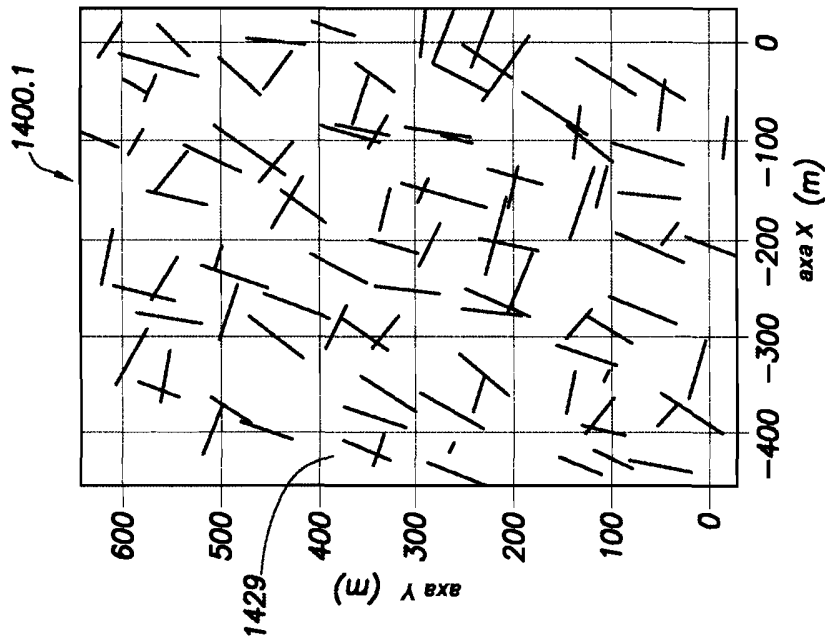


FIG. 14.1

16/21

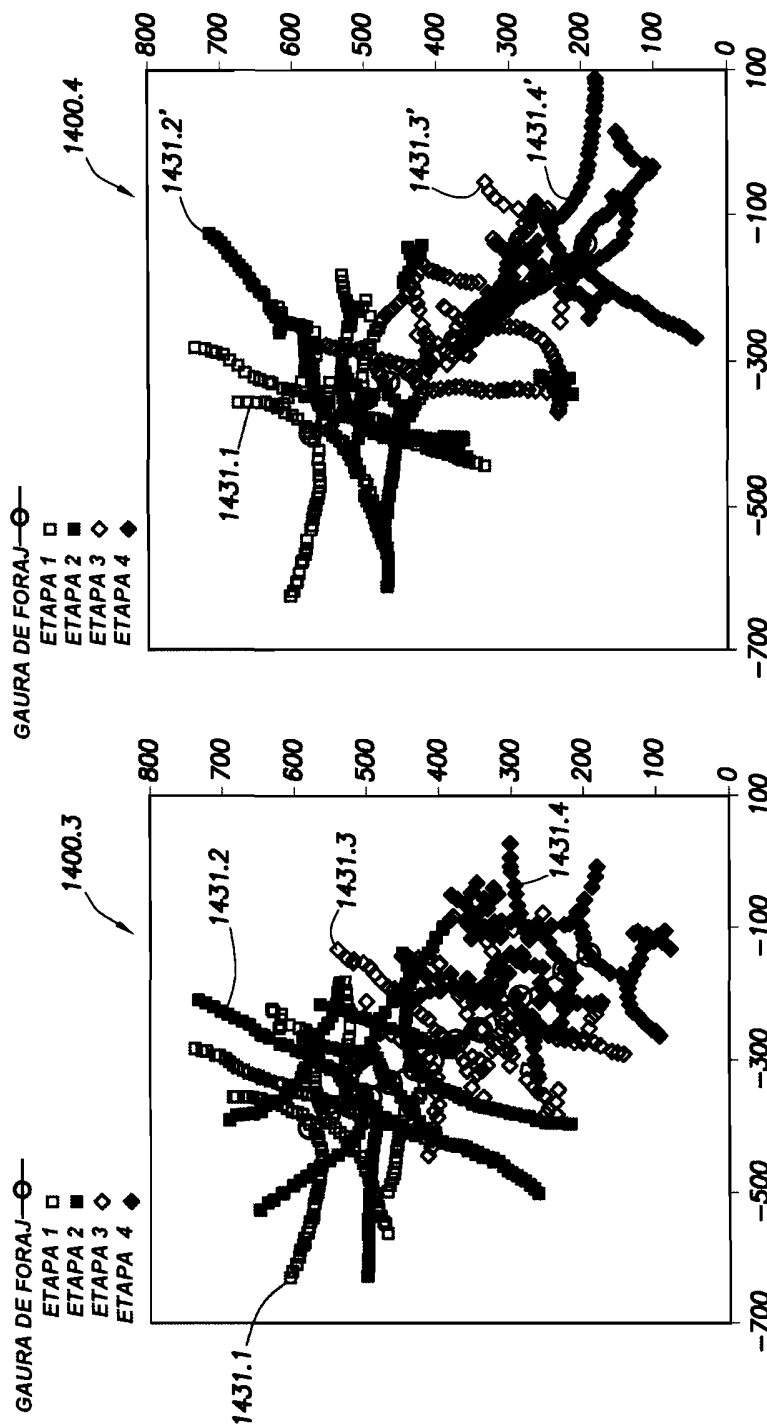
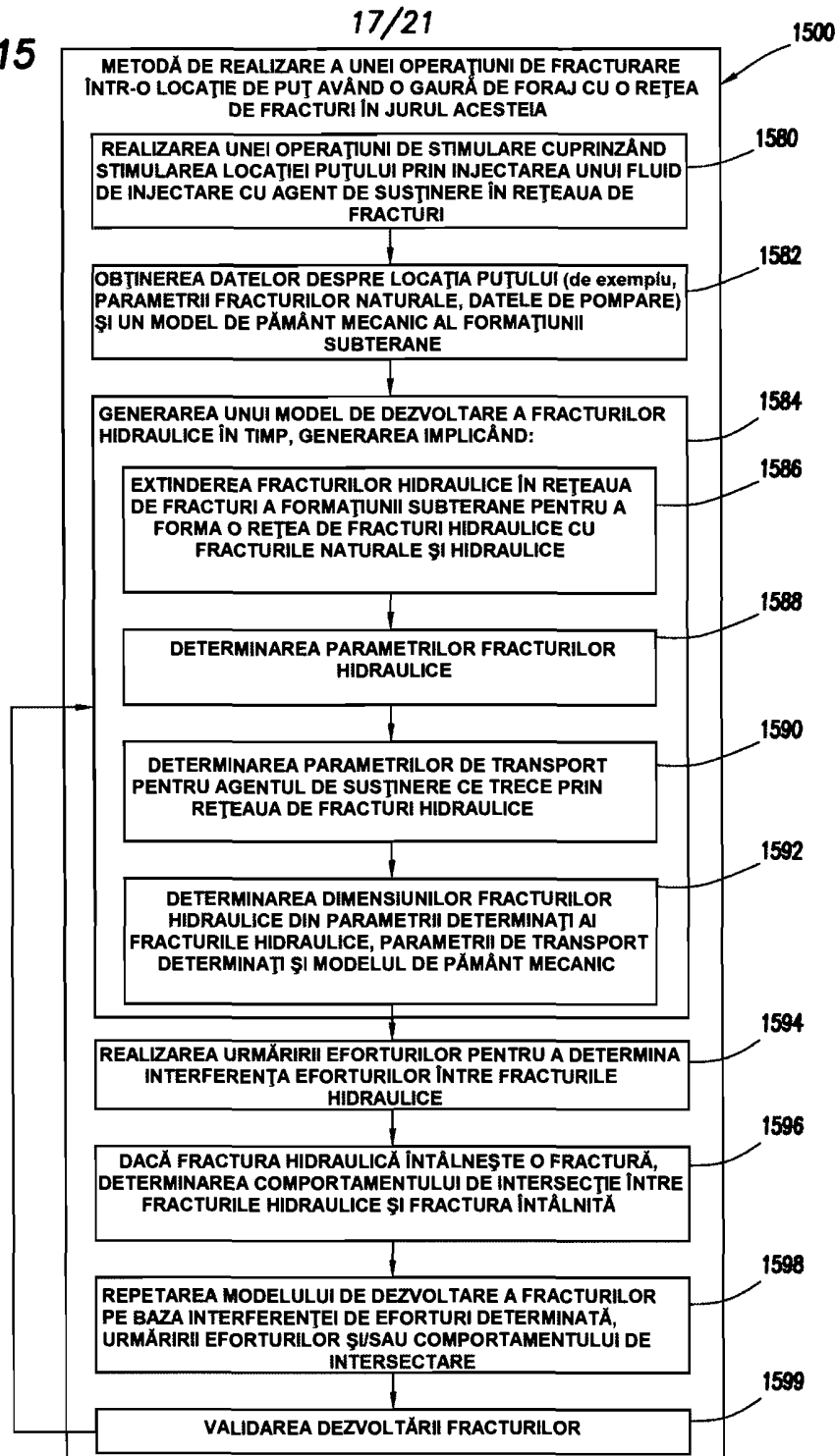
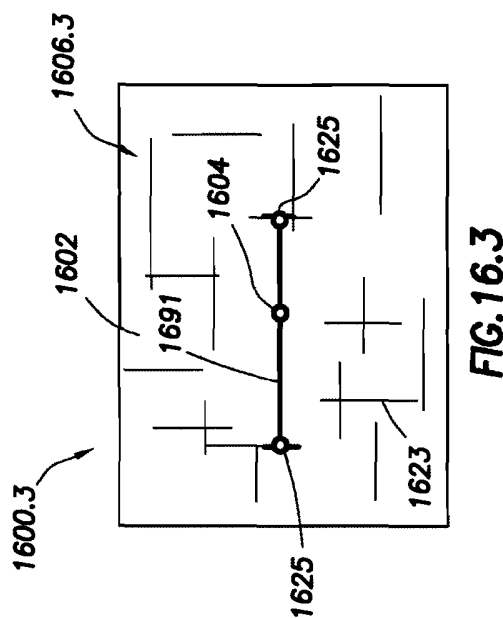
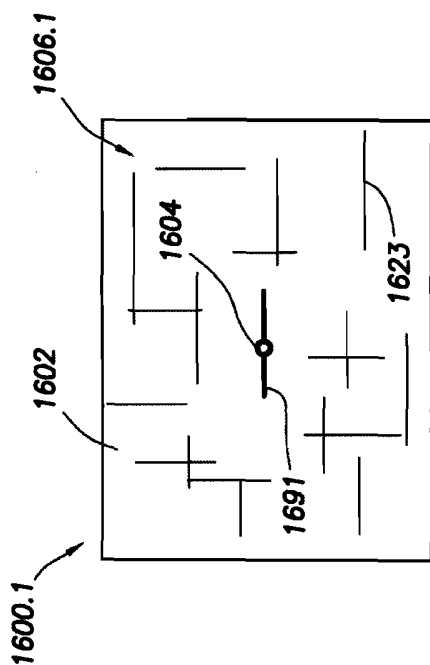
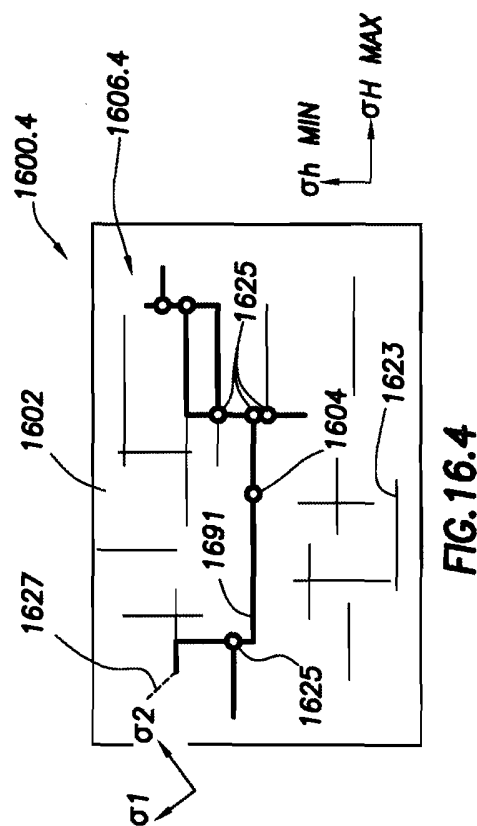
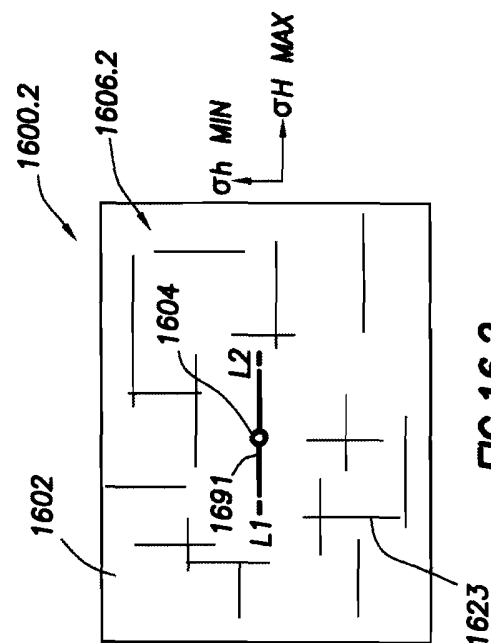


FIG.15





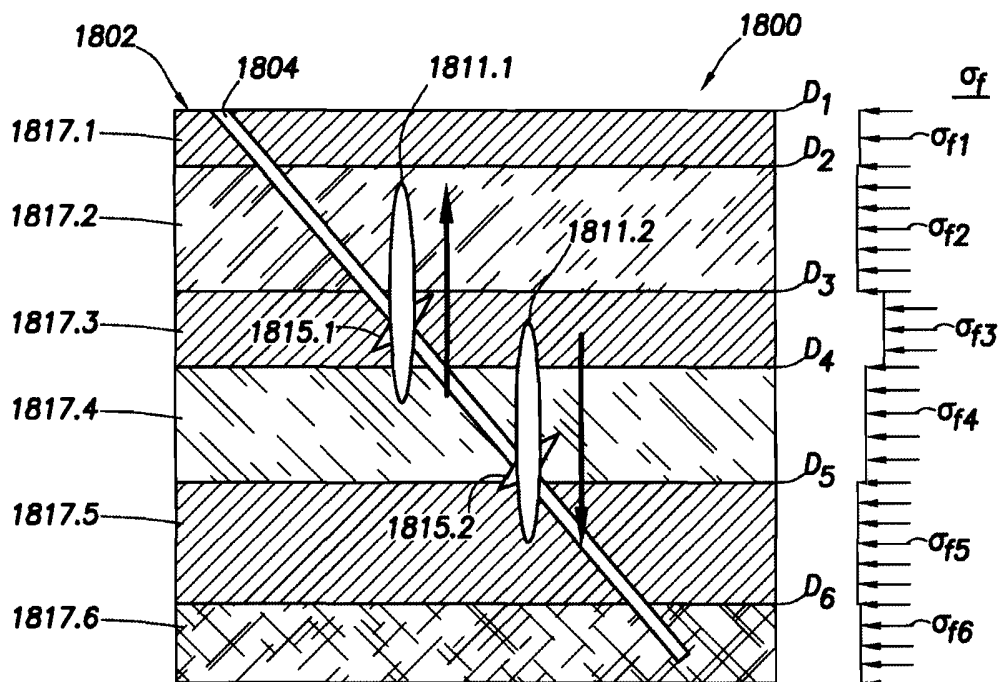
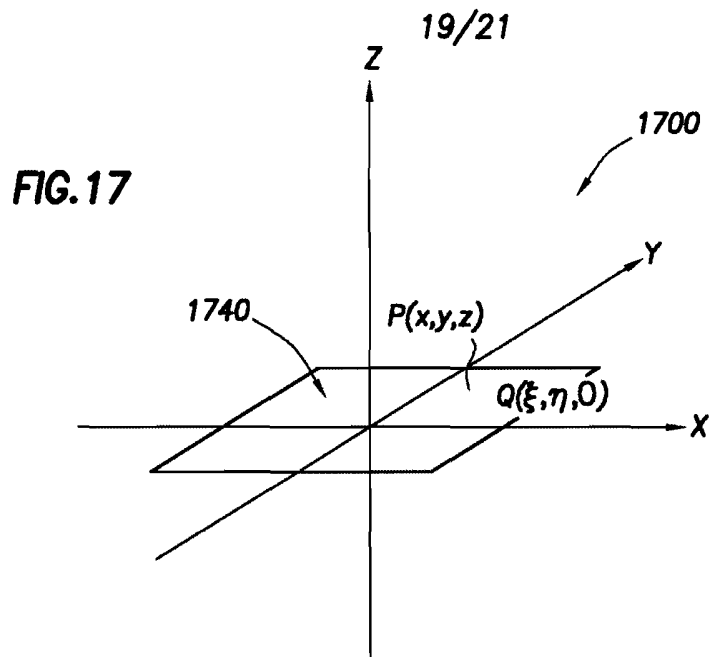


FIG.18

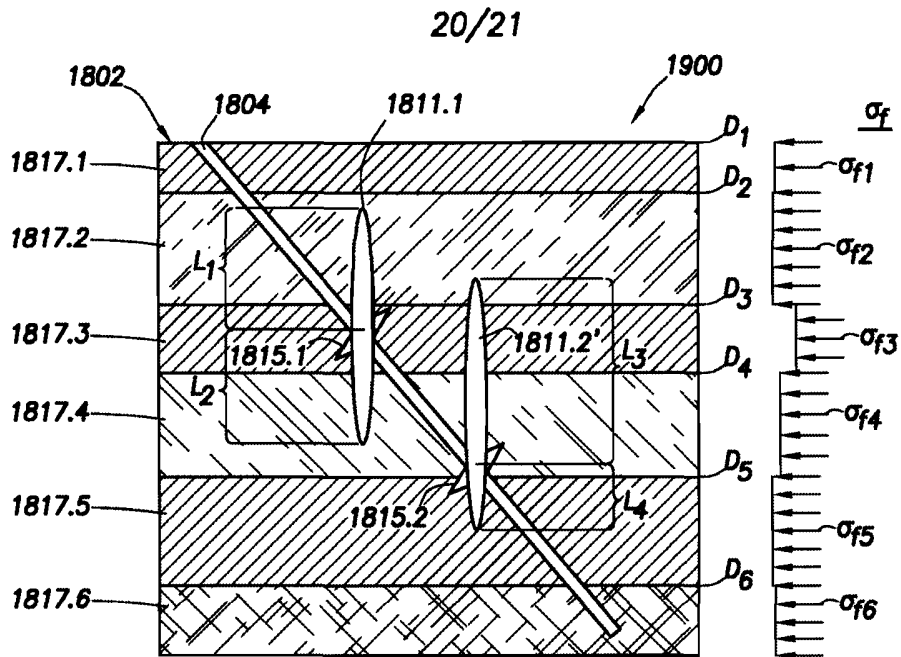


FIG.19

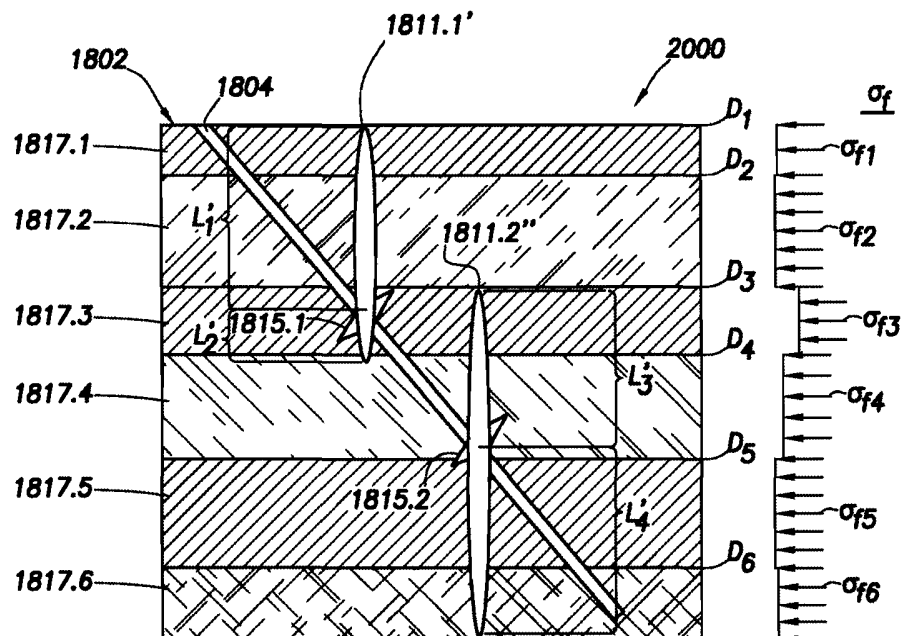


FIG.20

FIG.21

21/21

