



کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در مهندسی نفت

مهدی خویشوند^۱ ■ دانشکده مهندسی نفت - دانشگاه صنعتی امیرکبیر
احسان خاهه‌چی^۲ ■ دانشکده مهندسی نفت - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مقدمه

بهینه‌سازی به دنبال یافتن بهترین مقدار قابل دسترسی از یک تابع هدف تعریف شده در یک دامنه معین از متغیرها است. تعمیم تئوری بهینه‌سازی و مدل‌های فرمول‌بندی مسائل بخش بزرگی از ریاضیات کاربردی را شکل می‌دهد. برنامه‌ریزی خطی^۳، برنامه‌ریزی با اعداد صحیح و مختلط، مدل‌های شبکه‌ای^۴، برنامه‌ریزی غیرخطی^۵ و برنامه‌ریزی پویا^۶، برخی شاخه‌های ریاضیات کاربردی مرتبط با بهینه‌سازی هستند که امروزه در مدیریت و اقتصاد کاربرد وسیعی دارند. در بسیاری از مسائل در صنعت نفت با مواردی روبه‌رو می‌شویم که نیاز به انتخاب بهترین جواب یا جوابی نزدیک^۷ به آن داریم. تمامی این مسائل در حیطه بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. در این مقاله پس از بحثی مختصر راجع به بهینه‌سازی، کاربردهای آن را در زمینه‌های مختلف در بخش بالادستی صنعت نفت تشریح می‌کنیم.

برنامه‌ریزی ریاضی

از برنامه‌ریزی ریاضی برای تبدیل مسأله‌ی صنعتی به مسأله‌ی بهینه‌سازی

استفاده می‌شود. مسأله‌ی بهینه‌سازی به

شکل عمومی زیر ارائه می‌شود:

$$\min(\max) f(x) \quad (1)$$

Subject to:

$$g_i(x) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,m_1$$

$$g_i(x) = 0 \quad i=m_1, m_1+1, \dots, m$$

$$X \in R^n$$

که $f(x)$ را مقدار هدف می‌نامند. معادلات و نامعادلات دارای عبارت $g_i(x)$ محدودیت‌های مسأله است. در واقع هدف یافتن عنصر $X_{opt} \in R^n$ است که برای هر x متعلق به R^n داشته باشیم:

(۲) برای مسائل حداکثرسازی

$$f(X_{opt}) \geq f(x)$$

(۳) برای مسائل حداقل‌سازی

$$f(X_{opt}) \leq f(x)$$

در مسائل ممکن است اکسترم‌های محلی نیز وجود داشته باشند که یافتن جواب بهینه را مشکل می‌کنند. نمونه‌ای از اکسترم‌های محلی در شکل ۱ نشان داده شده است.

قسمتی از R^n را که در تمام محدودیت‌ها صدق می‌کند فضای شدنی جواب می‌گویند. در مسائل خطی این فضا یک یا تعدادی چندوجهی است که از تقاطع محدودیت‌های موجود در فضای n بعدی به دست می‌آید. در شکل ۲ نمونه‌ای از

¹ Mahdi.khishvand@gmail.com

² Khamehchi@aut.ac.ir

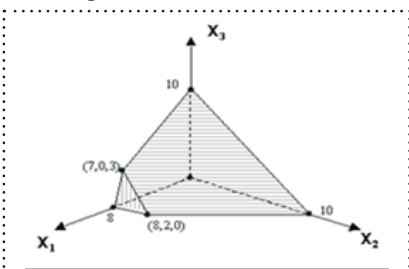
³ Linear Programming

⁴ Network Models

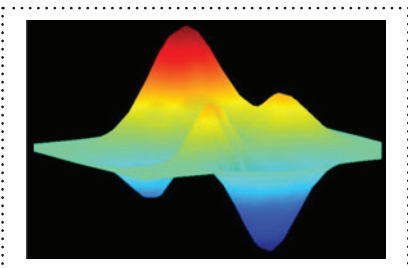
⁵ Non-Linear Programming

⁶ Dynamic Programming

⁷ Near Optimum Solution



شکل ۱ | فضای شدنی یک مسأله بهینه‌سازی در فضای سه بعدی [۲]



شکل ۲ | نقاط اکسترم محلی و کلی [۱]

تعیین میزان نفت قابل برداشت

یکی از وظایف مهم مهندسان مخزن تعیین میزان ذخایر موجود براساس مدل‌سازی‌های زمین‌شناسی و مخزنی و استفاده از تکنیک‌های ارزیابی آماری است. در این جا می‌توان برای مدل‌سازی مخزن از تکنیک‌های بهینه‌سازی کمک گرفت و باید با استفاده از روشی مناسب جواب بهینه را برای مطابقت فشار مخزن با فشارهای محاسبه شده توسط نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به دست آورد. سپس از آن برای برآورد اولیه نفت قابل برداشت در محل استفاده شود. Esmailzadeh (۲۰۰۸) و Guyaguler (۲۰۰۰) تحقیقاتی در این زمینه انجام داده و نتایج آن را منتشر کرده‌اند. در اینجا تابع هدف برحسب اختلاف بین فشار میدان و میزان فشار محاسبه شده توسط شبیه‌ساز است. به دلیل تفرع معادلات سیستم و وجود محدودیت‌های غیرخطی، استفاده از روش‌های کلاسیک غیرخطی در اینجا ناکارآمد و به روش‌های جدیدی برای حل نیاز است. الگوریتم ژنتیک روش مناسبی برای یافتن جواب بهینه تحت محدودیت‌های مخزن است. این الگوریتم معمولاً نیاز به یک جواب اولیه دارد که از جواب‌های شبیه‌ساز برای آن استفاده می‌شود [۴،۵].

کاربرد بهینه‌سازی در به دست آوردن تاریخچه‌ی تولید مخازن

یکی از کاربردهای بهینه‌سازی استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی کلی^{۱۵} برای به دست آوردن تاریخچه‌ی تولید مخازن است. Silva (۲۰۰۸) از شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۶} در به دست آوردن تاریخچه‌ی تولید مخازن استفاده کرد. در این مسائل باید به مخزن

و توسعه‌ی میداین از مهم‌ترین مسائلی است که در این حوزه مورد بحث قرار می‌گیرند.

Dougherty (۱۹۷۲) در مورد روش‌های کاربرد برنامه‌ریزی در توسعه‌ی یک میدان، مطالعاتی انجام داد. برای توسعه‌ی یک میدان استراتژی‌های زیادی و همراه هر گزینه محدودیت‌های خاصی وجود دارد. بهینه‌سازی استراتژی‌های تولید از یک میدان شامل فرآوردی مصنوعی، تغییرات نرخ تولید از میدان، تزریق آب یا گاز و تغییرات نرخ تزریق مخزن، برنامه‌ریزی تولید، اتصال چاه‌ها و ایجاد سیستم جمع‌آوری نفت^۸، نحوه‌ی چیدمان خطوط لوله، عملیات تکمیل هوشمند چاه^۹ و ... زمینه را برای تولید بهینه ممکن می‌سازد. هم‌چنین برای رسیدن به استراتژی بهینه می‌توان الگوی محل چاه‌ها^{۱۰} را تغییر داد و یا از چاه‌های کنارگذر^{۱۱} استفاده کرد. در اکثر مسائل، بودجه مهم‌ترین محدودیت موجود است.

از محدودیت‌های مهم دیگر می‌توان ظرفیت تزریق آب و گاز، ظرفیت جداسازی گاز یا آب در تفکیک‌گر و ظرفیت خطوط لوله را نام برد. تعداد چاه‌های موجود در منطقه و دکل‌های موجود برای حفار چاه نیز محدود می‌باشند. میزان بازیافت نفت از میدان نیز محدود به ضریب بازیافت می‌باشد. در اکثر مسائل ارزش خالص فعلی (NPV)^{۱۲} تابع هدف قرار می‌گیرد [۳]. در ادامه به ذکر مواردی از کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی در صنعت نفت می‌پردازیم.

● کاربرد در مهندسی مخازن

الگوریتم‌ها و روش‌های بهینه‌سازی در مهندسی مخازن کاربردهای بسیار گسترده‌ای دارند. از روش‌های بهینه‌سازی در تعیین محل چاه‌های تزریقی و تولیدی در مخزن^{۱۳}، بررسی روش‌های ازدیاد برداشت و بهینه‌سازی آن‌ها و برآورد تاریخچه‌ی تولید مخازن^{۱۴} استفاده می‌شود.

این چندوجهی‌ها را در یک فضای سه‌بعدی می‌بینید.

◆ روش‌های بهینه‌سازی

روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو گروه کلی دسته‌بندی کرد:

- روش‌های غیر مبتنی بر محاسبه گرادیان
- روش‌های مبتنی بر محاسبه گرادیان

در روش‌های نوع اول هیچ اطلاعاتی از گرادیان تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی در خلال فرآیند بهینه‌سازی لازم نیست و جستجو برای رسیدن به نقطه‌ی بهینه با مقایسه مقادیر تابع هدف در نقاط طراحی مختلف انجام می‌شود. روش‌های جستجوی تصادفی مانند الگوریتم ژنتیک و روش‌های بهینه‌سازی آنیلینگ در این دسته قرار می‌گیرند.

در روش‌های نوع دوم گرادیان‌های تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی نقشی اساسی را در فرآیند بهینه‌سازی ایفا می‌کنند. روش‌های تفاضل محدود و بسط سری تیلور مختلط از این نوع هستند. در این روش‌ها بعد از محاسبه مشتقات تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی، با استفاده از یک الگوریتم مرتبه اول یا دوم جستجو برای یافتن مقادیر بهینه آغاز می‌شود. در الگوریتم‌های مرتبه اول تنها مشتق اول تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی لازم است. به عنوان مثال می‌توان به الگوریتم سریع‌ترین شیب اشاره کرد. در این الگوریتم جستجو در جهت منفی بردار گرادیان انجام می‌شود. در الگوریتم‌های مرتبه دوم علاوه بر مشتق اول، مقادیر مشتق دوم تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی نیز مورد نیاز می‌باشد. الگوریتم‌های شبه‌نیوتنی از این نوع هستند.

◆ کاربرد در صنایع بالادستی نفت

در صنایع بالادستی نفت به دست آوردن پارامترهای مناسب حفاری، به دست آوردن تاریخچه‌ی تولید مخزن، تعیین استراتژی تولید، تعیین محل چاه‌های تزریقی، تغییرات نرخ تولید

⁸ Gathering System

⁹ Smart Well Completion

¹⁰ Well Pattern

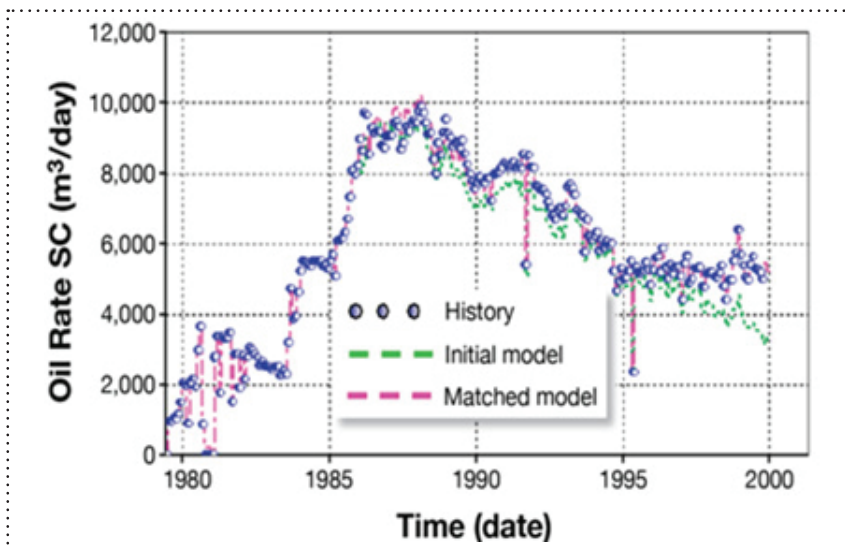
¹¹ Side Track Well

¹² Net Present Value

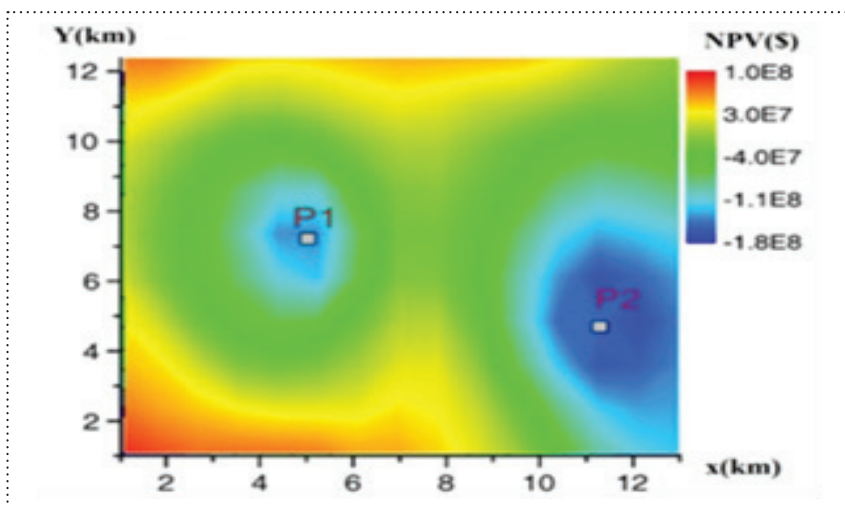
¹³ Well Placement

¹⁴ History Matching

¹⁶ Global Nonlinear Optimization



شکل ۳ | مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده‌ی تولید از یک مخزن [۶]



شکل ۴ | میزان NPV بر حسب مکان حفر دو چاه تولیدی P1 و P2 [۴]

شامل مدل‌های پیچیده و متغیرهای مدل‌سازی مخزن و محدودیت‌هایی نظیر محدودیت‌های زمین‌شناسی و تأسیسات سطح‌الارضی هستند. متغیرهای هدف شامل تعداد چاه‌های تزریقی، نرخ (فشار) تزریق، الگوی چاه‌ها و روند تزریق است.

Sudayanto و Yortosos (۲۰۰۰) بر روی استفاده از روش‌های حل بر اساس گرادینان^{۲۰}

¹⁷ Well Placement

¹⁸ Sweep Efficiency

¹⁹ Breakthrough Time

²⁰ Gradient Base Methods

استفاده می‌شود. در شکل ۵ کنتورهای مربوط به NPV را بر حسب محل حفر چاه تزریقی در بین چهار چاه تولیدی مشاهده می‌کنید.

عملیات تزریق آب

هدف اصلی در عملیات سیلاب‌زنی به عنوان یکی از عملیات مهم ثانویه در مخازن، تخلیه‌ی مخزن به بهترین شکل، تا بیشترین حد و به صورت بهینه است. معمولاً باید بازده جاروب کردن مخزن^{۱۸} و زمان گسست^{۱۹} را حداکثر کرد. مسائل بهینه‌سازی تزریق در میدان

پارامترهای مناسبی را نسبت داد، به طوری که شبیه‌سازی نتایج مشابه تولید واقعی به ما بدهد. نمونه‌ای از تاریخچه‌ی تولید شبیه‌سازی شده در شکل ۳ (دایره‌ها مقادیر واقعی و خط مقادیر شبیه‌سازی شده) نشان داده شده است. در اینجا معمولاً از شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله استفاده می‌شود. به کمک شبکه‌های عصبی و با کمک توابع هدف مناسب نظیر میزان اختلاف مدل و مقادیر واقعی پارامترهای مخزنی مناسب جهت به دست آوردن تاریخچه‌ی تولید انتخاب و استفاده می‌شود. الگوریتم‌های حل این مسائل معمولاً دارای چهار مرحله‌ی زیر است.

۱- انتخاب داده‌های مناسب از میان داده‌های

تولید مخزن

۲- تعریف تابع هدف مناسب برای بهینه‌سازی

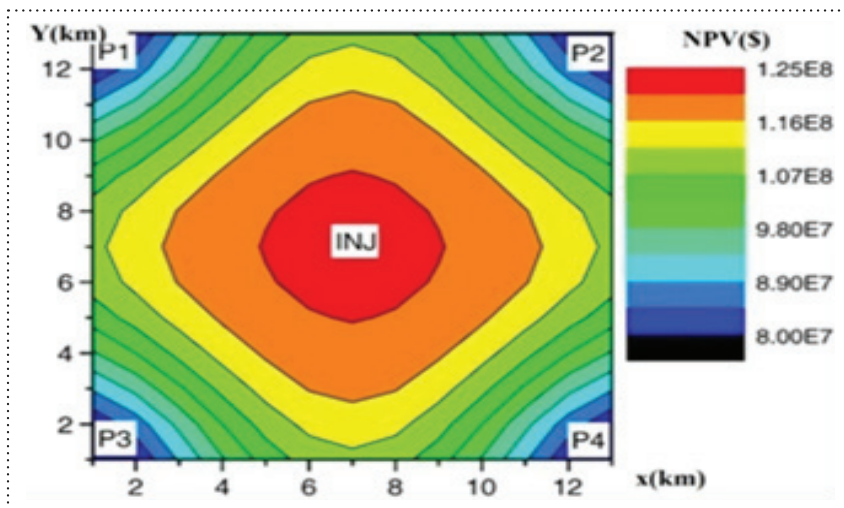
۳- تحلیل حساسیت روی مدل

۴- ارائه‌ی متغیرهای توقف الگوریتم نظیر

خطای نسبی [۶].

برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین محل چاه‌ها^{۱۷}

مدل‌های زیادی برای دست‌یابی به فاصله‌ی بهینه‌ی چاه‌های تولیدی در یک مخزن ارائه شده است، که شامل مدل‌های گرافیکی، تحلیلی و بهینه‌سازی است. در مدل گرافیکی بازده کل میدان بر حسب فاصله‌ی چاه‌ها رسم و بهترین گزینه انتخاب می‌شود. در بسیاری از مدل‌های تحلیلی نرخ تولید چاه در طی عمر آن را عددی ثابت گرفته و مسأله را با معادلات معمول حل می‌کنند. اما جدیدترین مدل‌ها که به بهترین جواب‌ها هم می‌رسد، مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی است. Zhang (۲۰۱۰) از مدلی برای این کار استفاده کرد، که در آن گزینه‌های مختلف در طول عمر مخزن یا افق برنامه‌ریزی بررسی و بهینه‌ترین جواب منجر به بیشترین NPV را انتخاب می‌کنند. در شکل ۴ میزان ارزش خالص فعلی بر حسب مکان حفر برای دو چاه تولیدی مشخص شده است [۷]. هم‌چنین برای ارزیابی مکان حفر چاه‌های تزریقی نیز از این روش



۵ | کنتورهای NPV بر حسب محل حفر چاه تزریقی در بین چهار چاه تولیدی [۴]

برای بهینه‌سازی عملیات تزریق آب تحقیق کردند. Allhuthal (۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰) مسائل به کمک شبیه‌سازی به روش خطوط جریان^{۲۱} برای مخزن ارائه داد. Brouwer و همکاران (۲۰۰۴) برای بهینه‌سازی از تابع هدفی مبتنی بر NPV استفاده کردند و مسأله را با آن حل کردند. هدف در اینجا افزایش نرخ تولید سیلاب‌زنی تا رسیدن به حداکثر بازده تولیدی از مخزن و با حداکثر NPV است [۳].

در این مسائل بعد از شبیه‌سازی مخزن برای بازه‌های زمانی متفاوت، شرایط و محدودیت‌های زمین‌شناسی را در آن دخالت داده، سپس خروجی مدل‌های شبیه‌سازی را وارد مرحله بهینه‌سازی می‌کنند. تابع هدف را بر اساس متغیرهای موجود نوشته و سپس آن را با توجه به محدودیت‌های مسأله بهینه می‌کنند. تابع هدف معمولاً شامل دو عبارت است: عبارت اول معمولاً به زمان باقیمانده معروف است، که برابر تفاضل زمان مورد انتظار رسیدن آب به هر چاه و زمان واقعی رسیدن آب به آن است. البته این عبارت را به توان دو رسانده تا در آن‌ها اثر مثبت و منفی حذف شود. از یک طرف باید این اختلاف کمینه شده و از طرفی باید عبارت دوم (تولید از مخزن) حداکثر شود. معمولاً تابع هدف در اینجا از درجه‌ی دو است و برای بهینه‌سازی از روش برنامه‌ریزی درجه‌ی دوم متوالی^{۲۲} استفاده می‌شود. حل این برنامه‌ی غیرخطی تحت محدودیت‌های میدانی، مخزن‌زی و زمین‌شناسی، تغییرات نرخ جریان تحت تولید را می‌دهد. تابع هدف به صورتی بیان می‌شود که اختلاف فاصله‌ی زمانی رسیدن آب به چاه‌های تولیدی را حداقل کند. به عبارتی در همه چاه‌ها زمان رسیدن گسست نزدیک به هم و اختلاف آن‌ها حداقل باشد.

● کاربرد در مهندسی حفاری

از دیگر استفاده‌های برنامه‌ریزی خطی استفاده در مهندسی حفاری می‌باشد. مهم‌ترین

از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های مدل هستند. علاوه بر این برای یک برنامه‌ریزی کامل علاوه بر دکل‌های حفاری، باید انواع دکل‌های بهره‌برداری و تعمیراتی و تست چاه را نیز در نظر گرفت و یک برنامه‌ی جامع برای آن‌ها به وجود آورد. زمان انتقال دکل‌ها در این مدل‌ها ناچیز فرض می‌شود. مسأله‌ی انتقال باید به گونه‌ای حل شود که هزینه‌ی انتقال دکل‌ها حداقل شود. تابع هدف در این مسأله معمولاً ترکیبی از مدل‌های حمل و نقل^{۲۳} و تخصیص^{۲۴} است [۸].

بهینه‌سازی عملیات حفاری

در عملیات حفاری توابع مختلفی برای بیان سرعت حفاری بر اساس پارامترهایی نظیر دور و وزن روی سرپشته، عمق، شیب فشار سازند، وزن گل حفاری و ... استفاده می‌شود. برای بهینه‌سازی عملیات حفاری، ابتدا تابع مناسب برای نرخ نفوذ^{۲۵} (سرعت حفاری) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و بهینه‌سازی به دست می‌آید، به نحوی که دارای حداکثر هم‌خوانی^{۲۶} با داده‌های چاه‌های حفار شده باشد. سپس مدلی

کاربردهای آن در عملیات حفاری، تعیین پارامترهای حفاری برای انجام عملیات بهینه، انتقال دکل‌ها و انتخاب دکل مناسب است.

انتقال دکل‌ها

یکی از کاربردهای برنامه‌ریزی در حفاری، استفاده از آن در انتقال دکل‌ها و برنامه‌ریزی آن‌ها برای حفاری در یک میدان می‌باشد. با حداقل کردن هزینه‌های انتقال و حفاری در عملیات اکتشاف و توسعه‌ی یک میدان نفتی، هزینه‌های زیادی صرفه‌جویی می‌شود. این مسأله اولین بار توسط شرکت Aramco عربستان و در سال ۲۰۰۷ برنامه‌ریزی شد. در تمام مدت برای انتقال دکل‌ها و زمان‌بندی عملیات حفاری از این برنامه‌ریزی استفاده شد. مسأله‌ی زمان‌بندی مسأله‌ای بزرگ و کاملاً پیچیده است. در این جا در یک دوره زمانی خاص مسأله حل می‌شود. در این گونه مسائل معمولاً شرح چاه‌ها شامل ترتیب حفر، مکان حفر و ... را از کارفرما دریافت کرده و سپس چاه‌های دارای توالی از پیش تعیین شده، مشخص می‌شوند. هزینه‌ی مهم در اینجا هزینه‌های انتقال و زمان انتظار دکل است.

محدودیت‌های حفاری، محدودیت تولید از مخزن، محدودیت توالی از پیش تعیین شده‌ی چاه‌ها، محدودیت دکل‌ها و توان آن‌ها

²¹ Stream Line Simulation

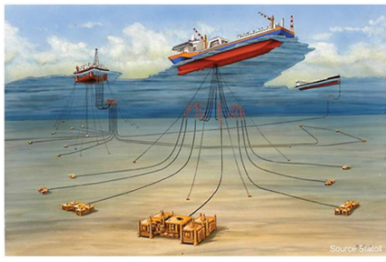
²² Sequential Quadratic Programming

²³ Transportation Model

²⁴ Assignment Model

²⁵ Rate of Penetration

²⁶ Fitness



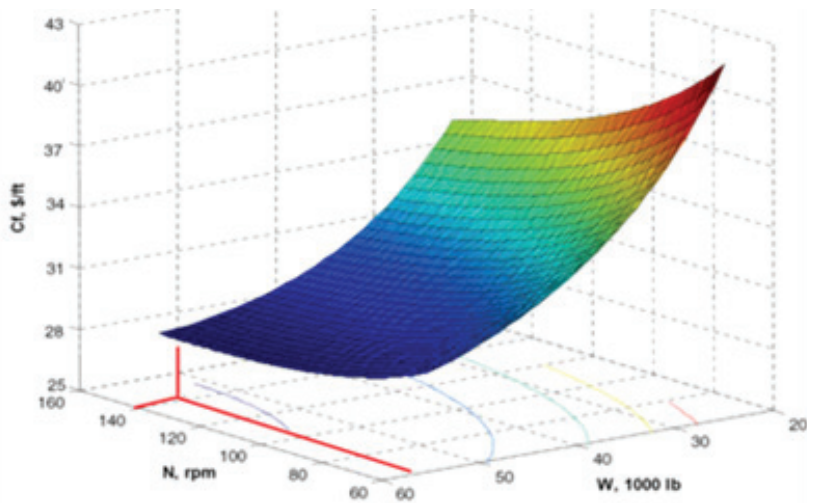
شکل ۷ | نمونه‌ای از سیستم بهره‌برداری دریایی با جزئیات [۱۹]

بسیاری از شرکت‌های نفتی در تولید از میداین بزرگ نفتی، با سناریوهای زیادی روبرو هستند، که هر کدام از آن‌ها توابع سود مختلفی دارند. برنامه تولید باید طوری باشد که حداکثر سود را از تولید و توسعه‌ی میدان داشته باشیم. بدین منظور مدل‌های برنامه ریزی مختلفی به دست آمده است.

از مهم‌ترین عواملی که در اینجا باید در مدل مدنظر گرفت، تغییرات قیمت نفت در اثر تغییر خواص آن در طی زمان است. بنابراین باید توابعی برای پیش‌بینی تغییر خصوصیات نفت مخزن در طی زمان و تخمین قیمت از روی آن وجود داشته باشد. معمولاً از توابع قطعه‌ای خطی^{۲۷} برای این کار استفاده می‌شود، گرچه برنامه‌ریزی پویا نتایج بهتری را به دنبال دارد. هدف در این مدل‌ها تولید نفت و گاز در هر مقطع زمانی به صورت بهینه از میدان است. تابع هدف در این مدل ارزش خالص فعلی که برآیند هزینه‌های تولید نفت و گاز از میدان، هزینه‌ی کاهش قیمت نفت با گذشت زمان بر اثر سنگین شدن نفت و یا تغییر سایر خصوصیات نفت، درآمد حاصل از فروش نفت و هزینه‌های انتقال است. محدودیت مهم مسأله تولید نفت خام از مخازن است که باید حداقل برابر تقاضای موجود در بازار باشد.

♦ طول ناحیه‌ی مشبک کاری در چاه‌های گازی

مخازن گازی با تولید تحت رانش سفره‌ی آب یکی از مهم‌ترین مخازن موجود هستند. به علت تجمع آب در رشته‌ی تکمیل در زمان



شکل ۶ | نقاط هزینه‌ی حفاری بر حسب دور و وزن روی سر مته [۱۰]

نیروی مکانیکی و بهینه‌سازی می‌کنند. در شکل ۶ هزینه‌ی حفاری بر حسب دو پارامتر دور و وزن روی سر مته رسم شده است [۱۱].

♦ کاربرد در مهندسی بهره‌برداری

بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک میدان^{۲۸}

معمول‌ترین کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در مهندسی بهره‌برداری، استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی برای بهره‌برداری بهینه از میداین نفتی یا گازی است. بهره‌برداری از میداین معمولاً تحت محدودیت تأسیسات سطح‌الارضی است. تابع هدف در اینجا حداکثر تولید نفت یا گاز از یک میدان با تجهیزات سطح‌الارضی محدود است. Litvak (۲۰۰۷) تحقیقاتی را برای بهینه‌سازی تولید از میداین انجام داد. مسأله تحت محدودیت جریان چندفازی در تفکیک گرها، خطوط لوله و محدودیت‌های فشاری سیستم بهره‌برداری نظیر افت فشار در خطوط لوله و گرهای سیستم بهره‌برداری و حداکثر سرعت در خطوط لوله است. متغیرهای تصمیم و کنترل در اینجا چگونگی اتصال چاه‌ها، تأسیسات سطح‌الارضی، خطوط لوله و نرخ تولید از چاه‌های مختلف است. در شکل ۷ نمونه‌ای از سیستم بهره‌برداری دریایی با تمام جزئیات را مشاهده می‌کنید [۱۲].

بهینه‌سازی روال تولید^{۲۹}

برای هزینه‌های حفاری تحت محدودیت‌های خاصی طرح و پارامترهای حفاری در چاه با برنامه‌ریزی غیرخطی تعیین می‌شود. در شکل شماره ۶ نمونه‌ای از تغییرات هزینه‌ی هر فوت حفاری^{۳۰} بر حسب دور و وزن روی سر مته آمده است.

مدل‌های زیادی برای بهینه‌سازی در عملیات حفاری انجام شده است. Bour-goynne در سال ۱۹۷۴ مدلی برای به دست آوردن سرعت حفاری ارائه داد. این مدل مهم‌ترین تابع به کار رفته در بهینه‌سازی عملیات حفاری است. با استفاده از داده‌های پیشین مدل ضرایب Bourgoynne برای سرعت نفوذ پیش‌بینی می‌شود و سپس با استفاده از مدل برنامه‌ریزی پیوسته‌ی دارای محدودیت خطی آن‌را حل کرده و پارامترهای عملیاتی بهینه را به دست می‌آورند [۹].

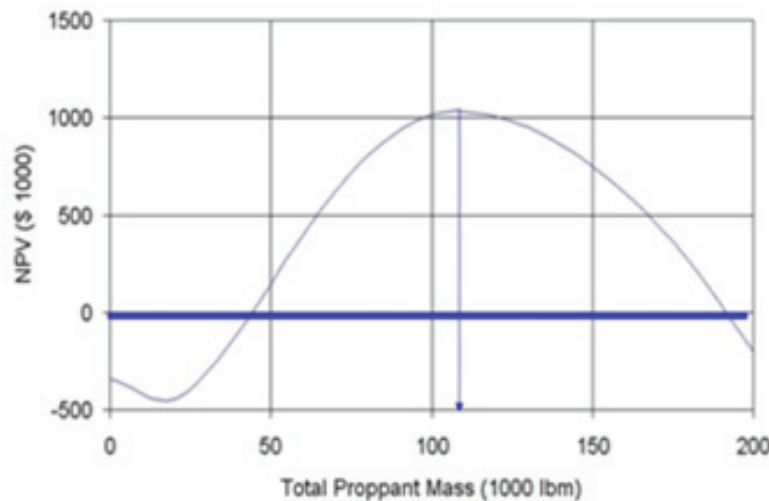
Woltanzowicz (۱۹۸۷) برای استفاده از سرمته‌های الماسه یک مدل برنامه‌ریزی پویا ارائه داد. در جدیدترین مدل‌ها با استفاده از توابع هدف غیرخطی که از مدل‌های سرعت نفوذ در آن‌ها استفاده می‌شود، تابع هدف مناسب را به دست آورده و سپس با توجه به متغیرهای موجود مسأله را تحت محدودیت‌هایی نظیر حد بالا و پایین سرعت دورانی، وزن روی سرمته،

²⁷ Cost per Foot

²⁸ Production Optimization

²⁹ Production Scheduling

³⁰ Piece Wised Linear Function



۸ | میزان NPV برحسب میزان مواد نگهدارنده‌ی شکاف [۱۶]

تولید از این مخازن، جاروب شدن مخزن به نحو مناسب صورت نمی‌گیرد. برای غلبه بر این مشکل باید طول ناحیه‌ی تکمیل شده را حداقل کنیم به طوری که باعث کاهش چشمگیر در نرخ تولید، تولید تجمعی و سود نهایی حاصل از میدان نشود. Armenta (۲۰۰۳) به بررسی این موضوع پرداخت [۱۳].

با توجه به تمام محدودیت‌ها تابع هدفی مناسب برای تولید بلندمدت در نظر گرفته می‌شود. این تابع را به علت طولانی بودن افق برنامه‌ریزی معمولاً به صورت NPV بیان می‌کنند. محدودیت‌های مسئله نیز شامل محدودیت‌های تولید از چاه، تغییرات پارامترهای مخزن، برش آب تولیدی و ... می‌باشد، متغیر اصلی در اینجا مربوط به تعیین نحوه و طول تکمیل شده‌ی چاه است.

◆ بهینه‌سازی عملیات تحریک چاه^{۳۱}

یکی دیگر از استفاده‌های بهینه‌سازی در عملیات تحریک چاه است. Sinson (۱۹۸۸) مطالعاتی بر روی استفاده از بهینه‌سازی در روش‌های تحریک انجام داد. برای تحریک چاه در مرحله‌ی اول با توجه به یک سری معیارها و قوانین، روش مناسب برای استفاده در چاه مورد نظر را انتخاب می‌کنند. سپس با استفاده از روابط و نمودارهای موجود مواد مورد استفاده و یک طرح عملیاتی اولیه برای انجام عملیات تحریک ارائه داده می‌شود. در نهایت پارامترهای عملیاتی بهینه می‌شوند. در حین بهینه‌سازی باید محدودیت‌هایی نظیر محدودیت‌های مخزن، تجهیزات سطح الارضی، هزینه‌های عملیاتی و ... را به حساب آورد [۱۴].

روش‌های تحریک شامل لایه شکافی هیدرولیکی، لایه شکافی با اسید^{۳۲}، اسید کاری ماتریکس سنگ و تکمیل مجدد می‌شوند. تکنیک‌های بهینه‌سازی در کلیه‌ی این روش‌ها قابل استفاده هستند. در اینجا دو مورد بسیار معمول از این روش‌ها را توضیح می‌دهیم.

بهینه‌سازی لایه شکافی هیدرولیکی^{۳۳}

Yang برای اولین بار بهینه‌سازی تولید از میدانی

عملیات سه مرحله لازم است:
 ۱- انتخاب سیال مناسب مصرف در نرخ‌های تزریق متفاوت که براساس معیارهای متفاوتی انجام می‌گیرد.
 ۲- عملکرد سیال و داده‌های شبیه‌سازی و اطلاعات مخزن برای تعیین بهترین شرایط عملیاتی مخلوط شوند. در ابتدا باید عرض شکاف و حجم سیال برحسب طول شکاف رسم و این کار برای انواع سیالات مختلف در نرخ‌های متفاوت انجام داده و مدل را توسعه دهیم.
 ۳- حل مدل و اطمینان از کاربردی بودن آن.

بهینه‌سازی عملیات اسید کاری

پارامترهای بسیاری بر موفقیت عملیات و نیز حداقل بودن هزینه‌ها و حداکثر شدن NPV در عملیات اسید کاری مؤثر هستند. Vogt و همکاران (۱۹۷۴) مدلی برای این کار توسعه دادند. در این مدل ابتدا از بین چاه‌های موجود، چاه‌های مناسب برای عملیات اسید کاری و سپس از بین سناریوهای اسید کاری برای آن‌ها، بهترین گزینه را انتخاب می‌کند. این مدل سوددهی خالص را با احتساب هزینه‌های مختلف، اثر تخلیه‌ی مخزن و اثر زمان روی ویژگی‌ها و قیمت نفت

نفت را انجام داد، اما برای بهینه‌سازی تنها نرخ تزریق، زمان تزریق و غلظت مواد نگهدارنده را در نظر گرفت و آن‌ها را متغیرهای تصمیم‌گیری قرار داد. Mohaghegh مدلی برای بهینه‌سازی طراحی لایه شکافی با اسید با استفاده از هیبریدهای مصنوعی حاصل از شبکه‌های ژنتیکی ارائه داد که بر اساس داده‌های انجام شده از دیگر چاه‌ها انجام می‌شود. Mahrer (۱۹۹۹) نیز تحقیقات زیادی روی هندسه‌ی شکاف انجام داد و بر اساس شرایط درجای مخزن مدلی برای بهینه‌سازی ارائه داد. Rah. man (۲۰۰۷) نیز تحقیقاتی بر روی بهینه‌سازی پارامترهای لایه شکافی انجام داد [۳، ۱۵].

در اینجا برای بهینه‌سازی از مدل‌های عدد صحیح مخلوط استفاده و پارامترهای طراحی مناسب برای لایه شکافی هیدرولیکی را تعیین می‌کنیم. با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط^{۳۴} خطی می‌توان حجم بهینه‌ی مواد نگهدارنده، نرخ پمپاژ بهینه و بعد مناسب شکاف برای طراحی بهینه را به دست آورد. این روش را می‌توان برای طراحی بسیاری از عملیات لایه شکافی با اسید نیز به کار برد. میزان NPV را می‌توان برای بهینه‌سازی بر حسب یک یا چند پارامتر نوشت. در شکل ۸، NPV بر حسب مقدار مواد نگهدارنده‌ی مصرفی رسم شده است.

در بهترین روش حل برای بهینه‌سازی

³¹ Well Stimulation Operations

³² Acid Fracturing

³³ Hydraulic Fracturing

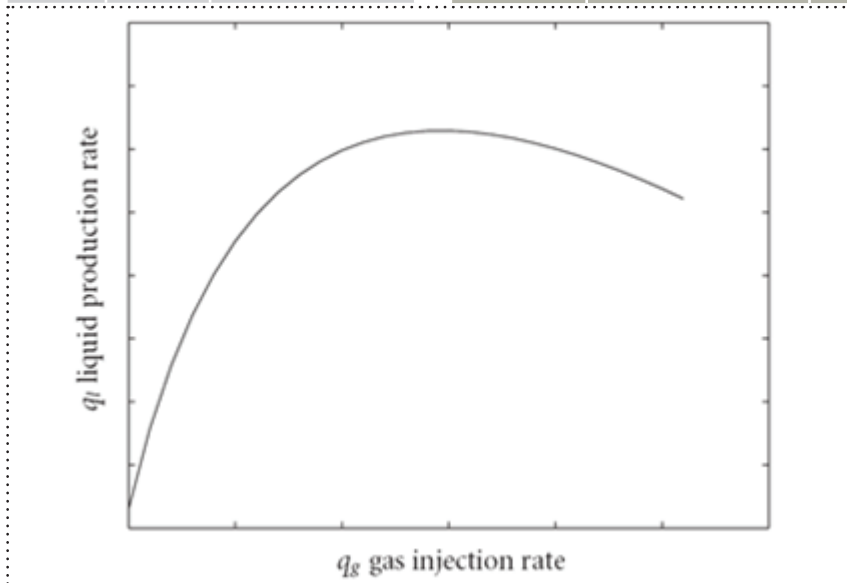
³⁴ Mix Integer Programming



۱ | مهمترین کاربردهای بهینه‌سازی در بخش بالادستی صنعت نفت

۲ | مقایسه‌ی نتیجه‌ی چند مورد از نتایج بهینه‌سازی با موارد قبلی

ردیف	مسئله بهینه‌سازی	تابع هدف که باید بهینه شود	متغیرهای بهینه‌سازی	پارامترهای محدودیت	روش‌های بهینه‌سازی
۱	بهینه‌یابی محل چاه	ارزش خالص فعلی تولید در افق پروژه	محل چاه‌ها	محدودیت‌های مختلف در طول عمر مخزن	الگوریتم ژنتیک
۲	انتقال دستگاه حفاری	هزینه‌های انتقال و زمان انتظار دستگاه حفاری	تخصیص و حمل و نقل دستگاه‌های حفاری	شرح چاه شامل ترتیب حفر و مکان حفر چاه	الگوریتم سیمپلکس، الگوریتم شاخه و کران
۳	بهینه‌سازی حفاری	هزینه‌ی حفاری بر فوت	سرعت دورانی، وزن روی سرمه	حد بالا و پایین سرعت دورانی، حد بالا و پایین وزن روی سر مه، حد بالا و پایین نیروی مکانیکی و...	الگوریتم ژنتیک
۴	زمان‌بندی تولید	ارزش خالص فعلی تولید در افق پروژه	زمان‌بندی تولید از چاه‌های مختلف و دبی تولید	تغییر خصوصیات نفت مخزن در زمان	الگوریتم ژنتیک، روش‌های مبتنی بر گرادیان
۵	لایه‌شکافی هیدرولیکی	ارزش خالص فعلی تولید	پارامترهای طراحی مناسب برای لایه شکافی هیدرولیکی	توان پمپاژ، حجم مواد نگهداره	الگوریتم ژنتیک+ شبکه‌های عصبی مصنوعی
۶	فرازآوری مصنوعی با گاز	فرازآوری سود روزانه یا ...	تولید نفت، سود روزانه یا ...	میزان گاز تزریقی در هر چاه	الگوریتم کوآسی- نیوتن، الگوریتم دسته ذرات



شکل ۹ | منحنی عملکرد فرازآوری با گاز [۱۷]

بهینه می‌کند. با افزایش حجم اسید تا حدی میزان بازدهی افزایش پیدا می‌کند، اما از آنجا که بعد از آنجا که میزان تغییرات بسیار کم می‌شود. پیدا کردن این مقدار بهینه یکی از کارهای مهم است. به طور کلی در این نوع مسائل بعد از انتخاب چاه مناسب برای عملیات، باید حجم و غلظت اسید، نرخ پمپاژ و سایر پارامترهای عملیاتی را بهینه کرد [۱۶].

◆ بهینه‌سازی عملیات فرازآوری با گاز ۳۰

در عملیات فرازآوری با گاز محدودیت‌های زیادی وجود دارد. این محدودیت‌ها شامل میزان گاز تزریقی، تجهیزات سطح الارضی و پارامترهای عملیاتی مختلف است. Kanu و همکارانش (۱۹۵۱)، Buitrago و همکارانش (۱۹۹۶) و Nishikiori و همکارانش (۱۹۸۹) تحقیقاتی را در زمینه استفاده از بهینه‌سازی در فرازآوری مصنوعی با گاز انجام دادند. Khamsehchi و همکاران (۲۰۱۱) نیز از الگوریتم دسته‌ی ذرات برای بهینه‌سازی عملیات فرازآوری با گاز استفاده کردند. معمولاً مدل‌های ارائه شده در اینجا، مدل‌های خطی تحت محدودیت‌های غیرخطی چندگانه‌ی مربوط به نرخ جریان بودند.

نفت تولیدی و مهم‌ترین محدودیت میزان گاز تزریقی در کل سیستم فرازآوری با گاز می‌باشد. از دیگر محدودیت‌ها میزان توان تأسیسات سطح الارضی در توانایی کنترل و جدایش گاز تولیدی از نفت و نیز توان کمپرسور می‌باشد.

از معروف‌ترین این مدل‌ها، مدل Lo (۱۹۹۲) است [۱۷، ۱۸]. معمولاً میزان نفت تولیدی از چاه‌های تحت عملیات فرازآوری با گاز در یک میدان مشخص را به صورت تابعی از میزان گاز تزریقی در آورده و به صورت یک منحنی به نام عملکرد فرازآوری با گاز نشان می‌دهند (شکل ۹). تابع هدف میزان کل

³⁵ Gas Lift Performance Curve

and Abnormal Pressure Detection". SPE-AIME (SPE) 4238, SPE-AIME Sixth Conference, Austin, Texas, USA.

- [10] Bahari, A. and Baradaran Seyed A. (2007). "Drilling Cost Optimization in Iranian Khangiran Gas Field". SPE 108246, SPE, International Oil Conference and Exhibition, Veracruz, Mexico.
- [11] Woltanowicz, A.K. and Kuru, E. (March, 15-18, 1987). "Dynamic Drilling Strategy for PDC Bits". SPE/IADC16118, SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, USA.
- [12] Litvak, M. et al. (2007). "Field Development Optimization Technology." SPE 106426, SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, USA.
- [13] Armenta, M. et al. (June 10 – 12, 2003). "Completion Length Optimization in Gas Wells". Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada.
- [14] Sinson, C.M. et al. (1988). "Optimization of Well Stimulation Strategies in Oil and Gas Fields". SPE 17792, SPE Symposium on Petroleum Industry Applications of Microcomputers, San Jose, California, USA.
- [15]- Rahman, M.M. (June 2003). "Optimizing Treatment Parameters for Enhanced Hydrocarbon Production by Hydraulic Fracturing". Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 42, No. 6, pp.38-46.
- [16] Vogt, T.C. and Anderson, M.L. (September, 1974). "Optimizing the Profitability of Matrix Acidizing Treatments". Journal of Petroleum Technology, Vol. 26, No. 9, pp.1055-1062.
- [17] Hamed, H.; Rashidi, F. and Khamechi, E. (2011). "A Novel Approach to the Gas-Lift Allocation Optimization Problem". Petroleum Science and Technology, Volume 29, Number 4, pp. 418-427.
- [18] Lo, K.K. (1992). "Optimum Lift-Gas Allocations under Multiple Production Constraints". SPE26017.
- [19] www.snclavalin.com

مربوط به نرخ تزریق گاز وارد می شود.

◆ نتیجه گیری

بهینه سازی به کمک برنامه ریزی خطی و غیر خطی در بسیاری از زمینه ها در صنعت نفت برای حداکثر کردن سود و حداقل کردن هزینه به کار برده می شود. مهم ترین موارد کاربردهای بهینه سازی در بخش بالادستی صنعت نفت در جدول ۱ آمده است. بهینه سازی در بخش بالادستی صنعت نفت به نتایج بسیار رضایت بخشی منجر شده است. به عنوان مثال چند مورد از نتایج بهینه سازی انجام شده و اثرات آن در جدول ۲ آمده است.

◆ منابع

- [1] www.computational-biophysics.org
- [2] www.home.ubalt.edu
- [3] Dougherty, E. L. (1972). "Application of Optimization Methods to Oilfield Problems Proved, Probable, Possible". SPE 3978, 62th North Central Expressway, Dallas, Texas, USA.
- [4] Esmailzadeh, F. and Nourafkan, E. (2009). "Calculation OOIP in Oil Reservoir by Pressure Matching Method Using Genetic Algorithm". Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 64, pp. 35-44.
- [5] Guyaguler, B. et al. (1-4 October 2000). "Optimization of Well Placement in a Gulf of Mexico Water-Flooding Project". SPE 63221, 2000. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA.
- [6] Silva, P.C. et al. (November 2008). "Application of Neural Network and Global Optimization in History Matching". Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 47, No. 11, pp. 23-25.
- [7] Zhang, K. et al. (2010). "Optimal Well Placement Using an Adjoint Gradient". Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 73, pp. 220-226.
- [8] Israel, M. (April 2008). "Advances in Rig Scheduling Techniques". Excerpt from Upstream Technology, Vol. 3, No. 4, pp.1-5.
- [9] Bourgoyne, A.T. and Young, F. (Jan. 22-23, 1973). "A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling

در فراز آوری با گاز دو مسأله بسیار مهم است. مسأله اول انتخاب عمق مناسب تزریق گاز است. هر چه این عمق بیشتر باشد، ستون سیال سبک شده درون چاه بیشتر و به گاز بیشتری نیاز است. در نتیجه هزینه ی بیشتری صرف می شود و البته میزان تولید نفت نیز بیشتر می باشد. دومین مسأله نرخ تزریق بهینه، هزینه های فراز آوری با گاز و بالاخص هزینه ی فشردن گاز توسط کمپرسور است. در این مسائل تابع هدف مجموعه ی تابع هزینه ها و تابع تولید نفت و درآمد حاصله از آن است. مسائل بهینه سازی فراز آوری با گاز به دو دسته تقسیم می شوند:

فراز آوری با گاز نامحدود

در مسائل نامحدود مسأله فاقد محدودیتی برای میزان گاز تزریقی در چاه ها است. در این جا توابع هدف مختلفی با توجه به خواسته ی مسأله جهت طراحی عملیات یا تعیین دبی تزریقی تعریف می شود. در این گونه مسائل، نقطه حداکثر منحنی عملکرد فراز آوری با گاز جواب بهینه ی مسأله نیست، بلکه معمولاً نقطه ای قبل آن که در آن شیب منحنی برابر حداقل شیب اقتصادی است جواب بهینه ی مسأله می شود. در این نقطه هزینه های افزایش دبی گاز به مقدار بسیار کمی برابر درآمد افزایش میزان تولید نفت در ازای آن مقدار است. در اینجا نیز ممکن است محدودیت هایی نظیر خطوط لوله و ظرفیت انتقال نفت در میان باشد [۱۶].

فراز آوری با گاز محدود

در مسائل فراز آوری با گاز محدود، نرخ تزریق گاز تحت یک محدودیت مهم دیگر نیز قرار می گیرد. در این مسائل مجموع میزان گاز تزریقی در چاه ها نباید بیشتر از گاز در دسترس شود. این محدودیت به خصوص در مناطقی که توان کمپرسور و یا میزان گاز ورودی به سیستم محدود است، کاربرد زیادی دارد. در اینجا نیز مانند قبل متغیر سیستم، تعیین نرخ تزریق و یا طراحی کل سیستم فراز آوری با گاز می باشد. تابع هدف عیناً مانند مسأله ی قبل تعریف شده و فقط در بخش محدودیت ها یک محدودیت