بسم الله الرّحمن الرّحيم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی نفت و گاز

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت
گرایش حفاری و بهره برداری

بهینه سازی تخصیص گاز به یکی از میادین نفتی ایران جهت فراز آوری با گاز

استادان راهنما:
دکتر حسین جلالی فر
دکتر حسن هاشمی پور رفسنجانی

استاد مشاور:
دکتر محمد رنجبر

مشاور صنعتی:
مهندس محمد خادم الحسینی

مؤلف:
یحیی رجبی کلته

شهریور ماه ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر و مادر مهربان و همسر عزیزم

و زنده یاد مهندس علیرضا افضلی پور بنیانگذار دانشگاه در کرمان

تشکر و قدردانی

سپاس خدایی را که در گذر از تمام مراحل و مشکلات زندگی یار و یاور ماست و بهترین هدایت‌گر، اوست. در اینجا قبل از هرکس از استادان دلسوز، سخت‌کوش و پرتلاشم **آقایان دکتر حسین جلالی فر، دکتر حسن هاشمی پوررفسنجانی و دکتر محمد رنجبر** که افتخار شاگردی ایشان را دارم و طی انجام این مجموعه با راهنمایی‌های روشن‌گرانه خود مددرسان اینجانب در حل بسیاری از مشکلات بوده‌اند، کمال قدردانی و تشکر را دارم.

با تشکر از آقایان **دکتر امیر صرافی** و **دکتر حسین نظام آبادی پور** که زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را بر خود هموار نمودند.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از مساعدت و زحمات خانم **دکتر مهین شفیعی و آقایان مهندس محمد خادم الحسینی، مهندس مصطفی فرامرزی، مهندس غفور مخدوم، مهندس حمید کاظمی ، مهندس فیروز فیروزی** که در انجام این تحقیق از هیچگونه مساعدتی به اینجانب دریغ نورزیده‌اند تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

فرازآوری پیوسته گاز یکی از مهمترین روش های فرازآوری مصنوعی است که در سراسر دنیا استفاده می شود. در میادینی که گاز با فشار بالا در دسترس است اقتصادی ترین نوع فرازآوری مصنوعی به کار گیری فرازآوری گاز است. در این روش مقدار گاز کافی به هر چاه باید تزریق شود تا بیشترین سود اقتصادی یا بیشینه تولید نفت حاصل شود. با این وجود در اکثر موارد حجم کل گاز در دسترس برای تزریق به مجموعه چاه ها محدود است، بنابر این تخصیص بهینه گاز بین مجموعه چاه ها از درجه اهمیت بالایی برخوردار است و هدف از بهینه سازی تخصیص گاز به دست آوردن بیشترین نرخ تولید نفت از مجموعه چاه ها با در اختیار داشتن حجم محدود گاز است. در این تحقیق از دو روش الگوریتم وراثتی و الگوریتم هارمونی برای تخصیص بهینه گاز در میدان عسلویه شرقی استفاده شده است که هر دو حالت بهینه سازی یعنی بیشترین نرخ تولید نفت با گاز در دسترس محدود و بیشترین سود اقتصادی در این میدان با استفاده از این الگوریتم ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که پیش بینی های به دست آمده از مدل های مورد استفاده برای چاه های فاقد تولید از کارایی بالایی برخوردار هست و همچنین الگوریتم های بکاربرده شده توانست به خوبی مقدار بهینه تخصیص گاز بین سه چاه موجود را پیش بینی نمایند. علاوه بر این از نتایج تحلیل ها بدست آمد که میزان سود خالص میدان با بکارگیری روش یاد شده با نرخ تزریق ۱۷ میلیون فوت مکعب در روز در حدود ۵۶۲۰۰۰ دلار در روز می باشد.

کلمات کلیدی: الگوریتم وراثتی، الگوریتم هارمونی خود وفقی، فرازآوری با گاز، تخصیص بهینه گاز

فهرست

فصل ۱ مقدمه ۱

فصل ۲ فرازآوری باگاز ۴

۲-۱ انواع فراز آوری باگاز ۶

۲-۱-۱ فراز آوری پیوسته باگاز ۶

۲-۱-۲ فراز آوری متناوب باگاز ۷

۲-۲ مزایای فراز آوری باگاز ۸

۲-۳ محدودیت های فراز آوری باگاز ۸

۲-۴ نمودار کارایی فرازآوری باگاز ۹

۲-۵ بهینه سازی فراز آوری باگاز ۱۴

۲-۵-۱بهینه سازی چاه مجزا ۱۴

۲-۵-۲ بهینه سازی میدان ۱۶

فصل ۳ الگوریتم های جستجوی هارمونی و وراثتی ۱۷

۳-۱ الگوریتم جستجوی هارمونی ۱۸

۳-۲ نسخه های مختلف الگوریتم جستجوی هارمونی ۲۰

۳-۲-۱ الگوریتم هارمونی بهبود یافته ۲۰

۳-۲-۲ الگوریتم هارمونی جامع ۲۰

۳-۲-۳ الگوریتم هارمونی جامع خود وفقی ۲۱

۳-۳ الگوریتم وراثتی ۲۲

۳-۳-۱ اصطلاحات مورد استفاده در الگوریتم وراثتی ۲۳

فصل ۴ مروری بر تحقیق های گذشته ۲۶

فصل ۵ روش تحقیق ۲۹

۵-۱ مشخصات میدان ۳۰

۵-۲ بررسی تولید میدان ۳۲
۵-۳ انتخاب لوله مغزی مناسب برای چاه ها..... ۳۳
۵-۴ محاسبه نقاط کارکرد به ازای تزریق های مختلف گاز ۳۵
۵-۵ انتخاب تابع متناسب سازی نقاط کارکرد ۳۸
۵-۶ بهینه سازی مسایل مقید..... ۴۱
۵-۶-۱روش جریمه..... ۴۳
۵-۷ بیان مسئله بهینه سازی..... ۴۳
۵-۷-۱ نتایج بهینه سازی برای گاز محدود ۴۵
۵-۷-۲ نتایج بهینه سازی اقتصادی ۵۰
فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادها ۵۳
پیوست..... ۵۵
پیوست ۱ جدول اندازه استاندارد لوله مغزی..... ۵۶
پیوست ۲ کد متلب الگوریتم های وراثتی و هارمونی خود وفقی..... ۵۸
منابع..... ۶۵

فهرست شکل ها

شکل(۲-۱): انواع روش های فرازآوری مصنوعی..... ۵
شکل(۲-۲): فرازآوری پیوسته گاز..... ۷
شکل(۲-۳): فرازآوری متناوب با گاز..... ۸
شکل(۲-۴): گرادیان فشار برای نسبت گاز به مایع های مختلف..... ۱۰
شکل(۲-۵): بهینه نقطه کارکرد چاه..... ۱۲
شکل(۲-۶): نقاط کارکرد به ازای نسبت های مختلف گاز به نفت..... ۱۲
شکل(۲-۷): تولید نفت در برابر نسبت گاز به مایع های مختلف..... ۱۳
شکل(۲-۸): نمودار کارایی فرازآوری گاز..... ۱۳
شکل(۲-۹): نمودار معمول کارایی فرازآوری گاز و نقاط بهینه اقتصادی و فنی..... ۱۴
شکل(۲-۱۰): نمودار کارایی فرازآوری گاز برای اندازه های مختلف لوله مغزی..... ۱۵
شکل(۳-۱): ساختار حافظه هارمونی..... ۲۰
شکل(۳-۲): نمودار بلوکی الگوریتم وراثتی..... ۲۵
شکل(۵-۱): آنالیز گره ای چاه(۱)..... ۳۲
شکل(۵-۲): آنالیز گره ای چاه(۲)..... ۳۲
شکل(۵-۳): آنالیز گره ای چاه (۳)..... ۳۳
شکل(۵-۴): نرخ تولید نفت به ازای اندازه های مختلف قطر لوله مغزی برای چاه (۱)..... ۳۴
شکل(۵-۵): نرخ تولید نفت به ازای اندازه های مختلف قطر لوله مغزی برای چاه (۲)..... ۳۴
شکل(۵-۶): نرخ تولید نفت به ازای اندازه های مختلف قطر لوله مغزی برای چاه (۳)..... ۳۵
شکل(۵-۷): نمودار کارایی چاه۱ با لوله مغزی۳/۹۵۸ اینچ..... ۳۶
شکل(۵-۸): نمودار کارایی چاه۲ با لوله مغزی۳/۹۵۸ اینچ..... ۳۷
شکل(۵-۹): نمودار کارایی چاه۳ با لوله مغزی۳/۹۵۸ اینچ..... ۳۷
شکل (۵-۱۰): متناسب سازی داده های چاه (۱) با روابط آلارکن و گومز..... ۳۹
شکل (۵-۱۱): متناسب سازی داده های چاه (۲) با روابط آلارکن و گومز..... ۳۹
شکل (۵-۱۲): متناسب سازی داده های چاه (۳) با روابط آلارکن و گومز..... ۴۰
شکل(۵-۱۳): مجموعه جواب های عملی و غیر عملی و ارتباط آنها با فضای رمز شده..... ۴۲
شکل (۵-۱۴): نمودار الگوریتم وراثتی برای ۳ میلیون فوت مکعب در روز..... ۴۶
شکل(۵-۱۵): نمودار الگوریتم هارمونی برای ۳ میلیون فوت مکعب..... ۴۶

شکل (۵-۱۶): نمودار الگوریتم وراثتی برای ۱ میلیون فوت مکعب در روز.....۴۸
شکل(۵-۱۷): نمودار الگوریتم هارمونی برای ۱ میلیون فوت مکعب.....۴۸
شکل (۵-۱۸): نمودار الگوریتم وراثتی برای ۴ میلیون فوت مکعب در روز.....۵۰
شکل(۵-۱۹): نمودار الگوریتم هارمونی برای ۴ میلیون فوت مکعب.....۵۰
شکل(۵-۲۰): نمودار الگوریتم وراثتی برای بهینه سازی اقتصادی.....۵۱
شکل(۵-۲۱): نمودار الگوریتم هارمونی برای بهینه سازی اقتصادی.....۵۲

فهرست جدول ها

جدول (۵-۱): اطلاعات چاه های میدان..... ۳۱
جدول(۵-۲): نرخ تولید نفت در برابر نرخ تزریق گاز..... ۳۶
جدول (۵-۳): بیشینه تولید فنی..... ۳۸
جدول (۵-۴): دقت متناسب سازی..... ۴۰
جدول (۵-۵): ضرایب تابع متناسب سازی آلارکن..... ۴۱
جدول(۵-۶): نتایج حاصل از الگوریتم وراثتی برای تزریق ۳ میلیون فوت مکعب در روز..... ۴۵
جدول(۵-۷): نتایج حاصل از الگوریتم هارمونی برای تزریق ۳ میلیون فوت مکعب در روز..... ۴۵
جدول(۵-۸): نتایج حاصل از الگوریتم وراثتی برای تزریق۱ میلیون فوت مکعب در روز..... ۴۷
جدول(۵-۹): نتایج حاصل از الگوریتم هارمونی برای تزریق۱ میلیون فوت مکعب در روز..... ۴۷
جدول(۵-۱۰): نتایج حاصل از الگوریتم وراثتی برای تزریق۴ میلیون فوت مکعب در روز..... ۴۹
جدول(۵-۱۱): نتایج حاصل از الگوریتم هارمونی برای تزریق۴ میلیون فوت مکعب در روز..... ۴۹
جدول(۵-۱۲): نتایج بهینه سازی اقتصادی..... ۵۱

فصل ۱ مقدمه

با حفر چاه در یک مخزن دو حالت پیش می آید، در حالت اول که انرژی مخزن زیاد است و توانایی رانش سیال تا سطح را دارد ودر حالت دوم انرژی مخزن کم است و نمی تواند سیال را تا سطح بیاورد یا اینکه انرژی مخزن با گذشت زمان تولید تحلیل رفته است. اگر انرژی مخزن برای بالا آوردن سیال کافی نباشد یکی از روش های فرازآوری مصنوعی که شامل انواع پمپ ها(مانند پمپهای میله ای، پمپهای الکتریکی غوطه ور و هیدرولیکی) و انواع فرازآوری باگاز(فرازآوری پیوسته با گاز، فرازآوری متناوب باگاز) است، را استفاده می کنیم.

از میان روش های مذکور با بررسی میدان بهترین روش را برای هر میدان باید انتخاب کنیم. از آن جا که کشور ایران یکی از کشورهایی است که دارای منابع عظیم گاز می باشد استفاده از این روش در میادین آن در اولویت قرار می گیرد زیرا هر جا که مقادیر زیاد گاز با فشار بالا در دسترس باشد اقتصادی ترین نوع فرازآوری تزریق پیوسته گاز است اگر شاخص تولید مخزن در حد قابل قبولی باشد.

فرازآوری گاز از منبع خارجی گاز با فشار بالا برای مکمل سازی گاز سازندی استفاده می کند. هیچ کدام از روش های فرازآوری مصنوعی مانند فرازآوری پیوسته گاز از انرژی مخزن به طور کامل استفاده نمی کند. در فرازآوری گاز به دنبال بیشترین نرخ تولید نفت از مجموعه چاهها با در اختیار داشتن حجم محدود گاز هستیم که در صنعت نفت به عنوان مسئله بهینه سازی تزریق گاز شناخته می شود. مسئله دیگری که در این زمینه وجود دارد بحث سود اقتصادی است، یعنی تعیین مقدار گاز تزریقی به هر چاه طوری که بیشترین سود اقتصادی با در نظر گرفتن درآمد حاصل از نفت تولیدی و مخارج گاز تزریقی را بدست آوریم. در این تحقیق سعی شده است از روش های متعدد تحلیل در جهت تعیین بهترین روش بهینه سازی فرازآوری با گاز استفاده شود که با بررسی های به عمل آمده از دو الگوریتم وراثتی وهارمونی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در طول پروسه تحلیل فرض شده است که جریان داخل لوله مغزی دو فازی است ودر تمام مراحل تحقیق از فرضیات جریان دو فازی استفاده شده است ودر نهایت با استفاده از تحلیل های انجام شده اهداف زیر مد نظر بود که تخمین زده شد:

- بررسی بکارگیری تکنیک فرازآوری با گاز در چاه های فاقد تولید
- بررسی کارایی الگوریتم های وراثتی و هارمونی در پیش بینی و بهینه سازی روش فرازآوری با گاز

- تخصیص بهینه گاز بین مجموعه چاه ها با در نظر گرفتن سود اقتصادی

تحقیق حاضر در فصل های زیر تنظیم و ارائه شده است:

در فصل ۲ مراحل فرازآوری گاز و روش تهیه نمودارهای کارایی و مزایا و محاسن این روش بررسی شده است.

در فصل ۳ خلاصه ای از الگوریتم هارمونی والگوریتم وراثتی ارائه شده است.

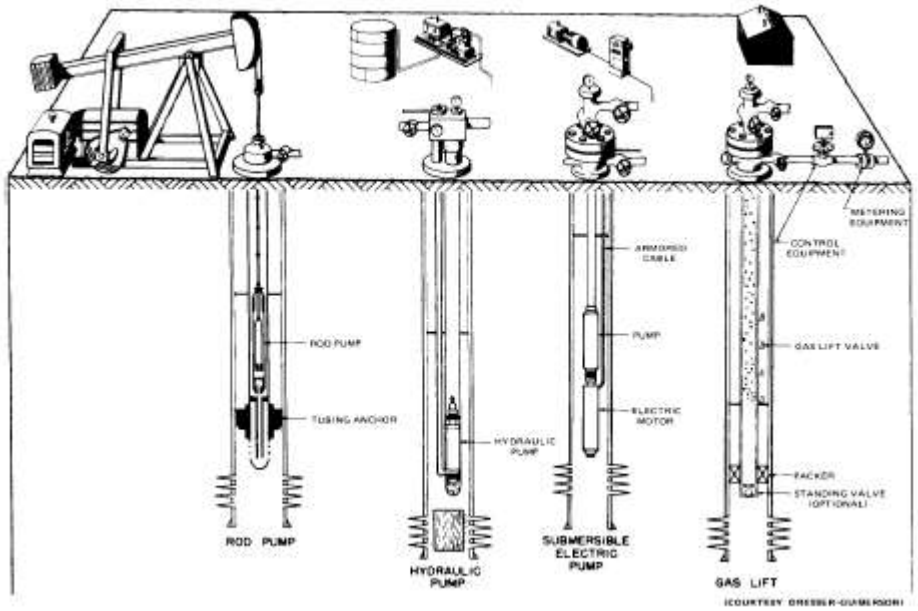
در فصل ۴ تحقیقات پیشین در مورد تخصیص بهینه گاز بین یک مجموعه چاه مورد بررسی قرار گرفته ودر مورد مزایا ومعایب هر کدام بحث شده است.

در فصل ۵ شرایط تولید میدان و بکارگیری روش فرازآوری گاز و بهینه سازی سناریو های مختلف تزریق برای میدان بررسی و بهترین سناریو برای میدان انتخاب شده است.

ودر پایان نتایج کلی و پیشنهادات در فصل۶ ارائه شده است.

فصل ۲ فرازآوری با گاز

اکثر چاه های نفتی که حفاری می شوند به طور طبیعی در دوره زمانی اولیه بعد از تکمیل تولید می‌کنند. فشار مخزن و گاز سازند انرژی کافی برای بالا آوردن سیال تا سطح را فراهم می کنند، در طی زمان که چاه تولید می کند به مرحله ای می رسیم که دیگر انرژی مخزن برای بالا آوردن سیال کافی نمی باشد و تولید چاه قطع می شود. وقتی که انرژی مخزن برای تولید کافی نباشد یا به گونه ای باشد که تولید مطلوب را فراهم نکند، در این صورت لازم است که یکی از روش های فرازآوری مصنوعی که شامل انواع پمپها وفرازآوری گازاست را جهت تامین انرژی لازم برای بالا آوردن سیال به سطح استفاده کنیم. در شکل (۲-۱) انواع روشهای فراز آوری مصنوعی نشان داده شده است [۳].



شکل(۲-۱): انواع روش های فرازآوری مصنوعی[۳]

فرازآوری با گاز عبارت است از تزریق پیوسته یا متناوب گاز به بخش پایین لوله مغزی برای حفظ یا افزایش پتانسیل چاه[۱].

مخلوط شدن گاز تزریقی با سیالات تولیدی منجر به کاهش گرادیان فشار جریانی شده که این امر باعث کارکرد چاه با فشار ته چاهی کم می شود که نتیجه آن حفظ یا افزایش تولید است [۱]. درفرازآوری گاز کار اضافی لازم برای افزایش نرخ تولید در سطح به وسیله یک کمپرسور یا جریان گاز با فشار قوی که به چاه منتقل می شود به صورت انرژی فشار گاز انجام می شود. در

دسترس بودن وهزینه متراکم سازی گاز از مهمترین نکاتی هستند که برای بکار گیری فرازآوری گاز باید مورد توجه قرار گیرند [۱].

زمانی که گاز وارد لوله مغزی می شود از دو طریق بر جریان مایع اثر می گذارد:

۱) انرژی انبساط گاز نفت را تا سطح هل می دهد

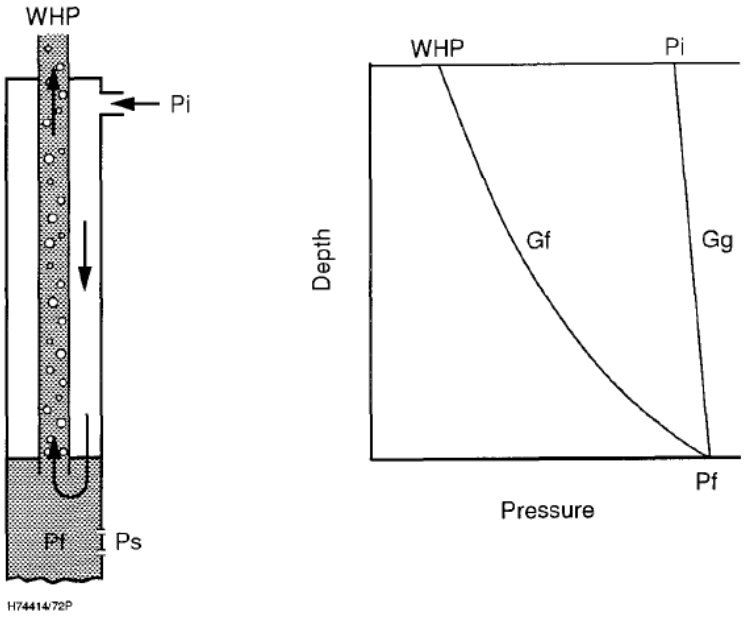
۲) با ورود گاز، سیال گازی می شود بنابر این چگالی موثر سیال کم می شود وآوردن سیال تا سطح آسان می شود.

۲-۱ انواع فرازآوری با گاز

۲-۱-۱ فرازآوری پیوسته با گاز

تزریق پیوسته گاز شبیه جریان طبیعی مخزن است. گاز به صورت پیوسته برای گازی کردن جریان مایع، با هدف سبک کردن ستون سیال که نتیجه آن افزایش نیروی محرکه مخزن است، تزریق می شود. با تزریق گاز نسبت گاز به مایع[1] زیاد می شود. این روش تنها در چاه هایی که نسبت گاز به مایع آنها کمتر از نسبت گاز به مایع بهینه است و فشار مخزن به اندازه کافی زیاد باشد که وقتی نسبت گاز به مایع را افزایش می دهیم تولید مطلوب را فراهم کند، عملی است. شکل(۲-۲) فرازآوری پیوسته با گاز را نشان می دهد. اکثر پروژه های تزریق گاز در این گروه قرار می گیرد. این روش در چاه های با دبی بالا (در مخازنی که شاخص تولید آنها بیشتر از stb/d/psi ۰/۵ است) و چاه هایی که فشار وارد بر ته چاه[2] زیاد است، استفاده می شود[۲و۳].

[1] Gas liquid ratio
[2] Back pressure



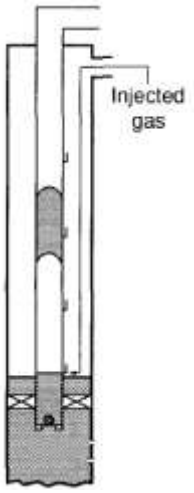
شکل(۲-۲): فرازآوری پیوسته گاز[۲]

۲-۱-۲ فراز آوری متناوب با گاز:

در این نوع فرازآوری با گاز، تزریق گاز به داخل چاه در دوره های زمانی خاص، وتا آنجا که ممکن است در پایین ترین نقطه چاه، در زیر ستون مایع که در چاه است تزریق می شود و بدین وسیله ستون مایع به سطح آورده می شود وسپس با تشکیل ستون جدید مایع در چاه مجددا تزریق انجام می شود. از این نوع فرازآوری معمولا در چاه های با دبی کم(مخازنی که شاخص تولید آن ها کمتر از۰/۵ stb/d/psi است)استفاده می شود. از این روش همچنین در مراحل انتهایی تولید از یک مخزن وقتی که فشار مخزن خیلی کم است و به علت فشار کم مخزن در این فاز از تولید نمی‌توانیم از فرازآوری پیوسته گاز بهره ببریم استفاده می شود [۲و۳].

محدودیت های تزریق متناوب گاز عمدتا مربوط به زمان چرخه می باشد که از زمان لازم بین تولید موفق لخته و تشکیل حجمی از مایع که بتوان به طور موثر به عنوان لخته بالا آورده شود به دست می آید.گاز تمایل به میانشکاف[1] از میان لخته مایع را دارد و قسمتی از مایع به ته چاه بر می گردد. کارایی درون ریز، طول وقطر لوله مغزی، فشار گاز، نرخ تزریق گاز و طول، وزن و ویسکوزیته لخته مایع پارامترهای کنترل کننده میانشکاف هستند [۲و۳].

[1] breakthrough



شکل(۲-۳): فرازآوری متناوب گاز[۲]

۲-۲ مزایای فراز آوری با گاز

انعطاف پذیری تزریق گاز بر حسب نرخ تولیدو عمق تزریق در مقایسه با دیگر روشهای فرازآوری در صورتی که حجم وفشار بالای گاز در دسترس است، قابل قیاس نیست. در چاههایی که انحراف زیاد، تولید ماسه ونسبت گاز به مایع بالایی دارند، اگر قرار باشد که فرازآوری مصنوعی انجام دهیم، فرازآوری گاز بهترین گزینه است. از آنجایی که اکثر پروژه های فرازآوری گاز برای افزایش تولید روزانه چاه ها طراحی می شوند نوع خاصی از شیرهای تزریقی وجود دارند که بدون کشتن چاه و بالا آوردن لوله مغزی می توانند جا گذاری شوند [۱-۳]. این نوع فرازآوری در چاه های با تولید کم و یا زیاد قابل استفاده است و همچنین در چاه های با قطر خیلی کم نیز می توان استفاده کرد.

۲-۳ محدودیت های فراز آوری گاز

کمبود گاز سازندی یا یک منبع خارجی با فشار گاز بالا، فاصله زیاد بین چاه ها، فضای کافی برای کمپرسورها در سکوهای دریایی از مهمترین محدودیت های فرازآوری گاز است. فرازآوری گاز برای چاه مجزا یا چاه هایی که فاصله زیاد از هم دارند و نمی توان یک سیستم نیروی مرکزی قرار داد، مناسب نیست. لوله های جداری قدیمی،گاز ترش و خطوط جریان طولانی با قطر داخلی کوچک برای فرازآوری گاز مسئله ساز است [۱-۳].

۲-۴ نمودار کارایی فرازآوری گاز

اگر فشار ته چاهی از اختلاف لوله مغزی که بوسیله گرادیان جریانی از داخل لوله مغزی ایجاد می‌شودکمتر باشد، فراز آوری با گاز انجام می شود[۴و۵]. برای هر نرخ تولید در داخل لوله مغزی به ازای هر نسبت گاز به مایع یک نمودار گرادیان فشار داریم،که در این نوع نمودارها فشار در برابر عمق رسم می شود، بنابر این برای هر فشار سر چاهی، فشار ته چاهی طبق رابطه (۲-۱) محاسبه می شود [۴و۵].

$$P_{tf} + \Delta P_{trav} = P_{wf} \qquad (۲-۱)$$

P_{tf} : فشار سر چاه بر حسب پام

P_{wf} : فشار ته چاه بر حسب پام

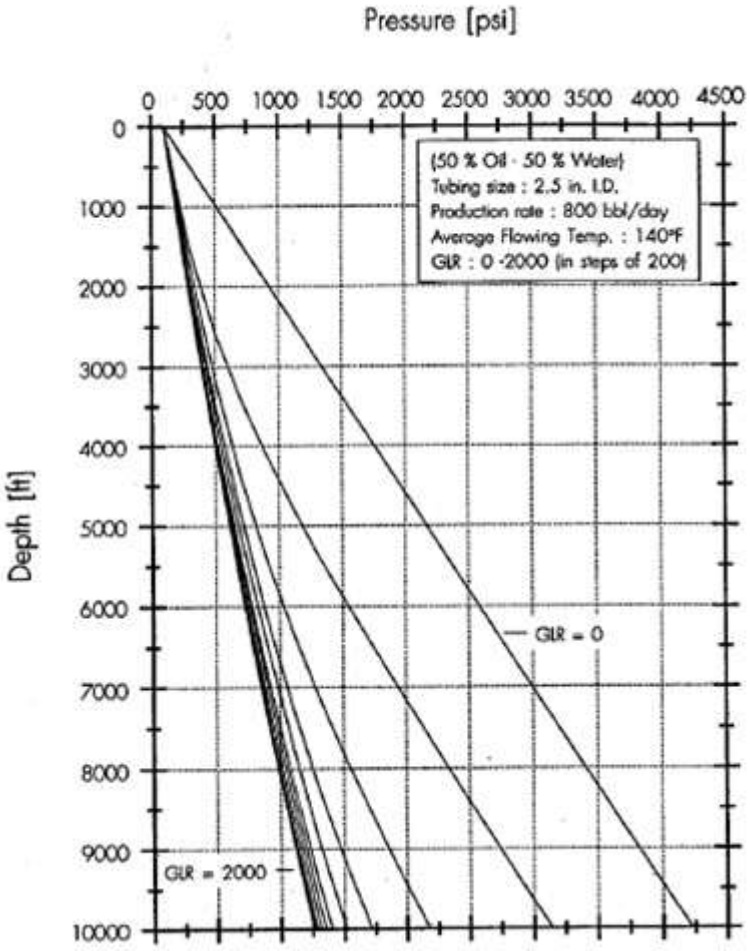
ΔP_{trav} مسیر فشار است که تابع نرخ جریان، نسبت گاز به مایع، عمق چاه، خواص و ترکیبات سیال می باشد. معادله (۲-۱) می تواند به عنوان گرادیان فشار جریانی به صورت رابطه (۲-۲) نوشته شود:

$$P_{tf} + \frac{dP}{dz} H = P_{wf} \qquad (۲-۲)$$

$\frac{dP}{dz}$: گرادیان فشار بر حسب پام بر فوت

H : عمق بر حسب فوت

همانطور که در شکل(۲-۴) می بینیم در طول عمق چاه گرادیان فشار ثابت نیست. همانطور که می دانیم برای نسبت گاز به مایع محدودیت وجود دارد، یعنی نسبت گاز به مایع ای وجود دارد که به ازای آن فشار ته چاهی کمترین مقدار خود را دارد و برای مقادیر نسبت گاز به مایع که از این مقدار بیشتر باشد گرادیان فشار جریانی شروع به افزایش می کند [۴و۵].



شکل(۲-۴):گرادیان فشار برای نسبت گاز به مایع های مختلف[۴]

گرادیان فشار جریانی ترکیب هد فشار هیدرواستاتیک، افت فشار تغییرات انرژی جنبشی و افت فشار اصطکاکی است. این ترکیب به صورت رابطه (۲-۴) نوشته می شود:

$$\Delta P = \Delta P_{PE} + \Delta P_{KE} + \Delta P_F \qquad (۴-۲)$$

ΔP_{PE} : هد فشار هیدرواستاتیک بر حسب پام

ΔP_{KE} : افت فشار تغییرات انرژی جنبشی بر حسب پام

ΔP_F : افت فشار اصطکاکی بر حسب پام