

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی سیلاب‌زنی با بخار

بهنام صدایی سولا و علی جدیری انتظاری
(دانشگاه صنعتی امیر کبیر)

چکیده

منابعی عظیم از نفت سنگین و ماسه‌های قیری، در سراسر جهان و ایران وجود دارد. بهره‌برداری از این منابع، به علت ویسکوزیته بالای نفت، وابسته به روش‌های ازدیاد برداشت معطوف به کاهش ویسکوزیته است. در این میان تزریق بخار، موفق‌ترین روشی است که به کار می‌رود و اهمیتی فراوان دارد سیلاب‌زنی با بخار، به عنوان یکی از روش‌های تزریق بخار، در زمینه‌های فرایند، تجهیزات و تأسیسات و پیش‌بینی عملکرد، پیشرفت‌هایی زیاد داشته که در این مقاله به شرح این پیشرفت‌ها و نیازهای تکنولوژیک آینده، پرداخته شده است.

اهمیت منابع نفت سنگین و روش های حرارتی

نفت سنگین و ماسه های قیری، منابع مهم انرژی اند. با کاهش منابع نفت سبک و کاهش احتمال اکتشاف مخازن جدید، نظرها به سوی نفت سنگین معطوف شده است و این منابع در تامین انرژی آینده، نقشی به سزا ایفا خواهند کرد. بزرگ ترین منابع نفت سنگین (با API بین ۱۰ تا ۲۰ درجه و قابل حرکت در شرایط مخزن) در ایالات متحده، ونزوئلا، کانادا و روسیه واقع شده اند. در خاورمیانه (ایران، عراق، سوریه، ترکیه، عربستان و

نفت سبک، تاکنون چندان مورد توجه نبوده اند، ولی با افت تولید نفت سبک و نیاز روزافزون به نفت، این منابع اهمیت قابل توجهی پیدا خواهند کرد.

آنچه تولید نفت سنگین را دشوار و میزان بازیافت را کم می کند در درجه اول، ویسکوزیته بالای آن است. بنابراین، روش های تولید از این منابع برای کاهش ویسکوزیته، متمرکز شده است و به طور کلی، روش های حرارتی به عنوان روش ها تشخیص داده شده اند. سایر روش ها اثر کمتری بر روی کاهش ویسکوزیته دارند. شکل ۱ تعداد

از میان روش های حرارتی نیز تزریق بخار بیشترین کاربرد را داشته، زیرا بخار، عامل فوق العاده ای برای انتقال حرارت است و مکانیسم هایی متعدد را در مخزن برای تولید نفت اعمال می کند. بر همین اساس، طی دهه ۸۰ در ایالات متحده ۸۰ درصد کل تولید نفت به وسیله روش های ازدیاد برداشت و آن هم از طریق تزریق بخار صورت گرفت. شکل ۲ بیانگر اهمیت نسبی پروژه های حرارتی است.

پیشرفت های سیلاب زنی با بخار

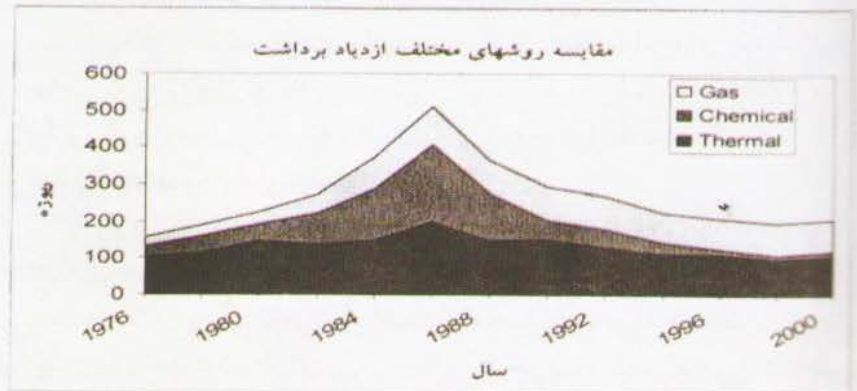
پیشرفت های سیلاب زنی با بخار از جنبه های فرایند، تاسیسات و تجهیزات تزریق و تولید و نیز روش های پیش بینی عملکرد (شبیه سازی عددی) قابل بررسی است.

پیشرفت های فنی در زمین شناسی، پتروفیزیک، مهندسی مخزن، مهندسی تاسیسات و مهندسی تولید، سبب کاهش قیمت و افزایش

بازیافت سیلاب زنی با بخار و در نتیجه، جذاب شدن منابع نفت سنگین و قیر برای سرمایه گذاری شده است. در ادامه به پیشرفت هایی که به این مهم انجامیده است اشاره می شود.

پیشرفت های فرایندی

اصلی ترین مکانیسم عملکرد سیلاب زنی با بخار، کاهش ویسکوزیته نفت است، به همین علت کاربرد این روش در سال های اولیه، برای مخازن با ویسکوزیته بالا و API پایین بوده است. به دلیل محدودیت تکنولوژی و تجربیات عملی در میدان، تزریق بخار در مخازن همگن،

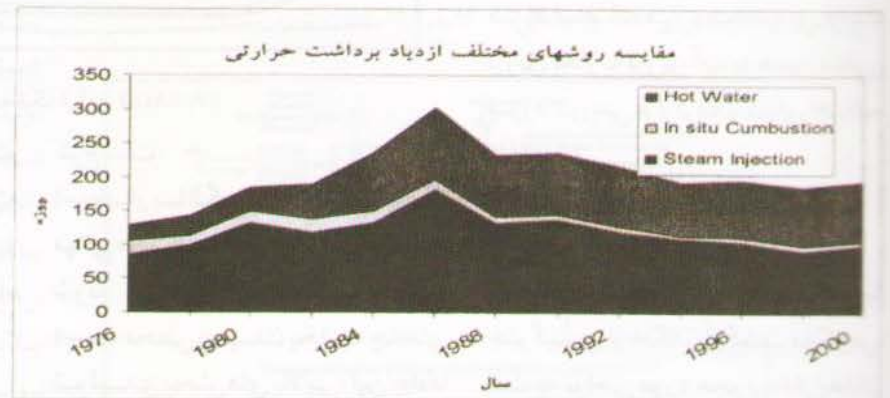


شکل ۱- تعداد پروژه های ازدیاد برداشت به روشهای مختلف در آمریکا از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۰

گویت) منابعی مهم از این نوع نفت واقع شده است.

در ایران، چندین میدان نفت سنگین مانند کوه موند، زاغه، فردوس، پایدار و... کشف شده اند که میلیارد ها بشکه نفت دارند که به علت فراوانی و سادگی تولید

پروژه های ازدیاد برداشت را به روش های مختلف حرارتی، شیمیایی و تزریق گاز در آمریکا، از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۰ نشان می دهد. به طور کاملاً مشخص، بیشترین تمرکز در ۲۵ سال گذشته بر روش های حرارتی بوده است.



شکل ۲- مقایسه تعداد پروژه های حرارتی در آمریکا از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۰



سیلاب زنی با بخار، به طور معمول از الگوهای رایج پنج نقطه‌ای و نه نقطه‌ای استفاده می‌شود، اما در مخازنی که دارای شیب بیشتر از ۱۰ درجه باشند، روش‌های تزریق خطی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که مخزن شیبی چندان ندارد، گسترش لایه بخار، با حرکت بخار به سمت بالا و آب به سمت پایین سازند، کنترل می‌شود. در مخازن با شیب قابل

کم عمق و با اشباع نفت بالا، از اهداف اولیه بوده‌اند. پیشرفت‌های جدید که در ادامه بحث خواهد شد، سبب تغییر این محدودیت شده و سیلاب زنی با بخار را برای مخازن نفت با API بالای ۲۰ و نیز API زیر ۱۰ قابل استفاده نموده است. مخازن عمیق‌تر و از نظر زمین‌شناسی پیچیده‌تر نیز می‌توانند تحت فرایند سیلاب زنی با بخار قرار گیرند.

روش چاه‌های افقی

"SAGD" روشی جدید است که از دو چاه افقی موازی برای بازیافت قیر یا نفت سنگین استفاده می‌کند. از چاه پایینی برای تولید و از چاه بالایی برای تزریق استفاده می‌شود. در این روش، از ریزش ثقلی (Gravity Drainage) نیز بیشترین استفاده را می‌برند. پیشرفت جدید دیگر در فرایند SAGD، استفاده از یک چاه افقی برای تزریق بخار و تولید نفت است که در شکل ۳ دیده می‌شود. این روش را که شرکت

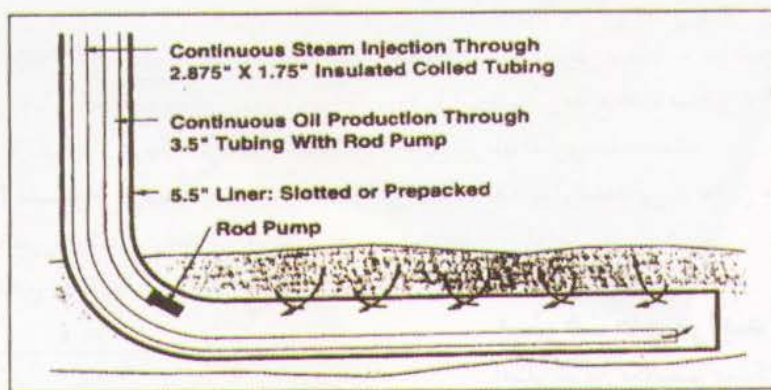
وجود کلاهک گازی یا آبد، فرایند سیلاب زنی با بخار را تحت تاثیر شدید قرار می‌دهد. در این موارد بهتر است از تزریق خطی استفاده شود و چاه تزریقی، از کلاهک گازی یا آبد دورتر باشد.

تزریق آب بعد از سیلاب زنی با بخار

همچنان که به فرایند سیلاب زنی با بخار ادامه می‌یابد، زمانی فرامی‌رسد که دبی تولید نفت کاهش و نهجت بخار به نفت (SOR) تا حد غیر اقتصادی، بالایی رود. در این صورت، باید برای ادامه یا قطع فرایند، تصمیم‌گیری کرد. SOR بالا، به طور معمول نشان می‌دهد که مقادیر زیادی گرما وارد مخزن شده و سنگ و سیال را گرم کرده است، اما این گرما، بیش از این بر بازیافت تاثیر گذار نیست. بنابراین، روشی لازم است که این گرما را مورد استفاده قرار دهد. تبدیل فرایند تزریق بخار به تزریق آب به همین منظور مورد بررسی قرار گرفته و دارای اهداف زیر است:

- ۱- ادامه تولید اقتصادی نفت
- ۲- کاهش مصرف سوخت
- ۳- اشباع لایه بخار با آب و کاهش یا جلوگیری از امکان بازگشت معکوس نفت به نواحی مورد هجوم بخار بعد از سرد شدن
- ۴- پخش کردن گرما در مخزن و

ملاحظه، حرکت بخار به سوی بالای مخزن متمایل است. به همین دلیل، برای رانش، می‌توان از جاذبه بهره‌گرفت، یعنی با تزریق بخار در بخش بالای مخزن، می‌توان آب میعان یافته و نفت را به سوی چاه‌های تولیدی راند. لذا، تولید از این مخازن به شدت به موقعیت چاه‌های تزریقی و تولیدی وابسته است. شرایطی که می‌توان از این روش برای حداکثر کردن کارایی تزریق بخار و بازیافت نهایی استفاده کرد به این



شکل ۳- طرح شماتیک فرایند SW-SAGD

- شرح است:
- ۱- بخار با الگوی خطی به قسمت میانی مخزن یا حتی پایینی آن تزریق شود.
 - ۲- به محض رسیدن بخار به چاه‌های تولیدی بخش‌های بالایی، این چاه‌ها بسته شود.
 - ۳- در ادامه، دبی بخار تزریقی کم شود.

ELAN Energy توسعه داده است SW-SAGD می‌نامند که این شرکت ادعای می‌کند که تولید با این روش، چندین برابر بیشتر از استفاده از دو چاه افقی در فرایند SAGD است.

مخازن با شیب بالا

در مخازن بدون شیب، برای



راندمان جارویی و مطلوب کردن نسبت تحرک، از سورفکتانت های (Surfactant) کفزا برای تبدیل بخار به کف می توان استفاده کرد که این روش با وجود مزیت های فراوان، بسیار گران است و مقدار زیادی از مواد فعال سطحی که گران هستند لازم دارد. مواد شیمیایی که اکنون مورد استفاده قرار می گیرند ارزان تر هستند، موادی مانند

جارو کردن نقاطی که بخار آنها را دور زده است. این روش با موفقیت در کالیفرنیا و آلمان اجرا شده است. **تزریق متناوب آب و بخار (WASP)**

تزریق متناوب آب و گاز، حرکت انگشتی (Fingering) گاز را کاهش می دهد و راندمان جارویی عمودی و در نتیجه، بازیافت را در پروژه های تزریق گاز بهبود می بخشد.

در مورد تزریق بخار هم، همین مطلب صادق است چرا که تزریق بخار اساساً یک تزریق غیرامتزاجی با اثرات گرمایی و میعان است، دلیل اصلی استفاده از WASP جلوگیری از رخنه (Break trough) سریع بخار در چاه های تولیدی است. با رسیدن بخار به چاه تولیدی، مشکلاتی مانند گرم شدن لوله های چاه تولیدی و هدر رفتن بخار و کاهش تولید چاه به وجود می آید. استفاده از این روش، هم جارو و هم بازیافت نفت را بهبود می دهد. این روش، در روسیه و کالیفرنیا با موفقیت انجام گرفته است.

شکل ۴ شمایی از این روش را ارائه می دهد. مزیت مهم این روش، علاوه بر تولید انرژی مفید، بازده گرمایی بالای آن ۸۰ درصد است.

جداسازی و تصفیه آب تولیدی

در فرایند سیلاب زنی با بخار، مقادیر زیاد آب تولید می شود. که حدود یک سوم آن، تصفیه و به دیگ بخار بازگردانده می شود و بقیه آن، در آبده های عمیق دفع می شوند یا به حوض های تبخیر فرستاده می شوند. این روش ها، دارای محدودیت هایی است از جمله بالا آمدن سطح آب آبد و هزینه زیاد استفاده از حوض های تبخیر به دلیل محدودیت های زیست محیطی.

اکنون روش هایی برای جداسازی و تصفیه آب تولیدی و فروش آن به عنوان آب کشاورزی تکامل یافته اند.

تولید کننده بخار در چاه

نیاز به بهره برداری از مخازن نفت سنگین عمیق تر از ۲۵۰۰ فوت، میل به استفاده از تولید کننده بخار در ته چاه را افزایش داده است. دورویکرد عمده در این مورد وجود دارد: تولید کننده برخورد مستقیم یا غیر مستقیم بخار. در تولید کننده با برخورد مستقیم، بخار در تماس مستقیم با گرمای احتراق و گازهای احتراق تولید می شود و هم بخار و هم گازهای احتراق در سازند تزریق می شوند. در نوع دوم، بخار در تبادل حرارت گازهای

پلیمر با درجه حرارت بالا با ژل های لیگنوسولفونات (Lignosulfonate Gels) که برای افزایش راندمان جارویی با مسدود کردن کانال ها و نواحی با نفوذ پذیری خیلی بالا به کار می روند.

روش ها و تجهیزات سطحی

بخار مورد استفاده در تزریق بخار، به وسیله ژنراتورهای تک گذر (Single Pass) میدان های نفتی تولید می شود که بخاری با فشار بالا و معمولاً با کیفیت ۸۰ درصد است. تلاش های زیر، برای بهبود فرایند تولید بخار انجام شده است:

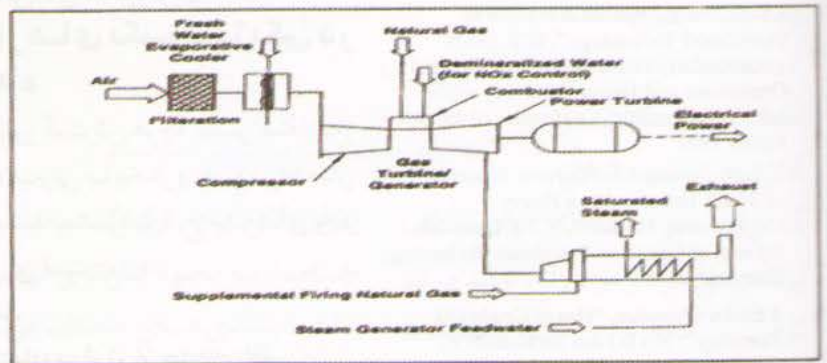
تولید همزمان بخار و برق

هنگامی که به مصرف انرژی برق زیاد نیاز است، دستگاه های تولید همزمان برق و بخار، صرفه جویی خوبی در هزینه دارند (در صورتی که گاز برای سوخت، ارزان و در دسترس باشد) این روش در کالیفرنیا استفاده شده است.

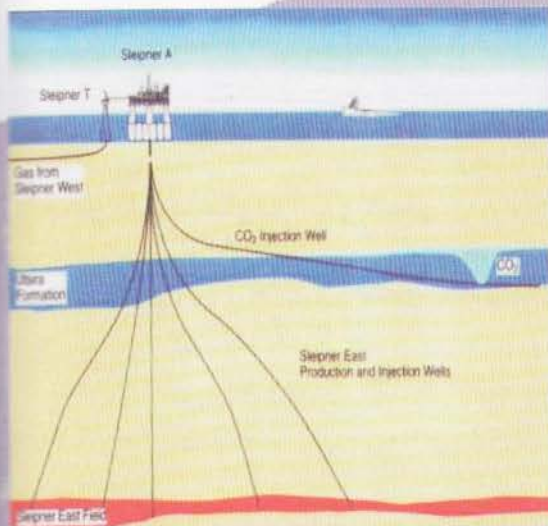
کنترل حرکت بخار

(Steam Conformance Control)

هر چند سیلاب زنی با بخار روشی موفق برای بازیافت نفت است با وجود این نقاط ضعفی مانند راندمان جارویی پایین و راندمان جابجایی کم آب میعان یافته نیز دارد. برای غلبه بر مشکل



شکل ۴- طرح شماتیک تولید همزمان بخار و برق



در سال‌های اولیه مبتنی بر مدل‌های تحلیلی گرم کردن بوده است. برای سازندهای با ساختمان ساده، این روش‌ها می‌تواند جواب‌گو باشد ولی برای حل هم‌زمان معادله‌های حرکت بخار، نفت، آب و انتقال حرارت برای مخازن با ساختمان پیچیده مناسب نیست.

با پیشرفت کامپیوترهای با سرعت بالا، استفاده از شبیه‌سازهای عددی برای حل این معادله‌ها ضروری است. شبیه‌سازهای گرمایی متعددی هم‌اکنون وجود دارند مانند:

Stars, VIP-Therm, Cheers, Eclipse500 Therm و نیز شبیه‌سازهای مخصوص کمپانی‌های نفتی.

این شبیه‌سازها در فرمولاسیون‌های ریاضی (مانند معادله‌های موازنه حرارت و مواد) با هم مشابه و در روش‌های حل مساله و قابلیت شبیه‌سازی با هم متفاوتند. همه شبیه‌سازهای فوق قادر به شبیه‌سازی تزریق آب، تزریق آب گرم، تزریق بخار و تحریک با بخار هستند. به علاوه Stars و Therm قادر به شبیه‌سازی احتراق درجا و نیز شبیه‌سازی تزریق افزودنی‌های گاز (مانند CO₂ یا گازهای احتراق) و یا شیمیایی (مانند مواد کف‌زا) همراه با بخار هستند. Cheers هم می‌تواند جریان بخار-کف را شبیه‌سازی کند. Eclipse500 نیز قادر به شبیه‌سازی افزودنی‌های هیدروکربنی است.

نیازهای تکنولوژیکی در آینده

به منظور گسترش هرچه بیشتر استفاده از سیلاب‌زنی با بخار و بهبود راندمان فرایند پیشرفت در زمینه‌های زیر ضروری است:

فرایند

- استفاده موثرتر از چاه‌های افقی
- استفاده موثرتر از روش SAGD

احتراق تولید می‌شود و بخار تولیدی به سازند تزریق شده و گازهای احتراق از فضای میانی لوله مغزی و لوله‌های جداری دفع می‌شوند.

این روش عمومیت نیافته است و مشکلاتی مانند کم‌دوام بودن و محدودیت تزریق گازهای احتراق در سازند وجود دارد.

لوله مغزی عایق شده

برای سازندهای عمیق‌تر از ۲۵۰۰ فوت، باید از لوله مغزی عایق شده استفاده کرد. برای این منظور، از دو عدد لوله مغزی که یکی در داخل دیگری جوش شده است استفاده می‌شود و فضای میانی دو لوله از گاز پرمی شود. برای جلوگیری از اتلاف حرارت در اتصالات نیز می‌توان از ترکیبات تفلون استفاده کرد.

تزریق بخار در چند لایه

گاهی لازم می‌شود که بخار، به‌طور هم‌زمان در بیش از یک هدف تزریق شود، به این منظور، از دو یا چند لوله مغزی موازی استفاده می‌شود که هر کدام یک لایه بخار را تزریق می‌کنند و بین دو لایه با توپک (Packer) از هم جدایی شود. این روش در کالیفرنیا در بیش از ۱۵۰۰ چاه استفاده شده است.

چاه‌های تزریقی با قطر کم

با پیشرفت روش‌های حفاری و تکمیل چاه‌های با قطر خیلی کم، می‌توان چند چاه تزریق بخار با قطر کم را با هزینه کمتر از یک چاه معمولی حفر کرد که امکان جداسازی بخار و تزریق آن در چند لایه مختلف را امکان‌پذیر می‌کند.

مونیتور کردن پروفایل تزریق

تعیین پروفایل تزریق در یک پروژه سیلاب‌زنی با بخار بسیار مهم است. به این منظور، می‌توان از گازهای رادیواکتیو (مانند Kt85) یا ترکیبات محلول در آب رادیواکتیو (مانند ید ۱۳۱) به عنوان ردیاب استفاده کرد.

پیش‌بینی عملکرد

پیش‌بینی عملکرد سیلاب‌زنی با بخار

- سیلاب‌زنی با بخار در سازندهای کربناته، شکافدار و دیاتومه
- بهبود کارایی سیلاب‌زنی با بخار در سازندهای عمیق
- کنترل تحرک بخار با روش‌های ارزان تاسیسات سطح الارضی
- استفاده از ذغال سنگ برای تولید بخار
- اندازه‌گیری دقیق و صحیح دبی و کیفیت بخار
- بهبود روش‌های توزیع و تقسیم بخار در لوله‌های تزریق
- تاسیسات تحت الارضی
- تولیدکننده‌های بخار ته‌چاه برای سازندهای عمیق و یا مناطق دریایی
- عایق کردن لوله مغزی‌های با هزینه مناسب
- کنترل و مونیتور کردن پروفایل حرکت بخار
- تکمیل چاه افقی، کنترل تولید ماسه

1. K.C. Hong, "Recent Advances in Steamflood Technology", SPE 54078 presented at the International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium held in Badersfield, California, 17-19 March 1999

2. S.M. Faroug Ali, "Current Status of Steam Injection As a Heavy Oil Recovery Method", JCPT 74-01-05, Journal of Canadian Petroleum Technology Montreal 1974.

3. Ender Okandan, "Heavy Crude Oil Recovery", NATO Asi Serisseries E, Applied Sciences, No.76, Martinus Nijhoff Pub., 1984