



I.I.E.S

ارزیابی اثرات بالقوه شکست هیدرولیکی در تولید نفت و گاز بر منابع آب آشامیدنی

(برگرفته از گزارش آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (EPA))

دیدگاهها و تحلیلها

شماره ۲۵

ترجمه و ارزیابی گزارش: اعظم محمداقبري

تهران - خیابان ولیعصر - روبروی پارک ملت -

خیابان سایه - پلاک ۶۵

تلفن: ۲۷۶۴۴۳۲۹ صندوق پستی: ۴۷۵۷-۱۹۳۹۵

آدرس اینترنتی:

[energydiplomacy.iies.ac.ir](http://energydiplomacy.iies.ac.ir)

## مقدمه

از اوایل سال ۲۰۰۰، نوآوری در فناوری‌ها، شیوه تولید نفت و گاز در ایالات متحده را تغییر داده است. شکست هیدرولیکی، همراه با تکنولوژی‌های حفاری پیشرفته، استخراج از منابع نفت و گازی را که پیش از این غیر قابل دسترس بودند، به لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر نموده است. این امر افزایش تولید از منابع انرژی داخلی را به همراه داشته و منافع اقتصادی بسیاری را برای ایالات متحده به ارمغان آورده است.

رشد تولید نفت و گاز داخلی، همزمان نگرانی‌هایی را مبنی بر اثرات بالقوه بر سلامت انسان و محیط‌زیست پدید آورده است. از جمله این اثرات می‌توان بر کمیت و کیفیت منابع آب آشامیدنی اشاره کرد. چنانچه برخی از ساکنان نزدیک به مناطق چاه‌های حفاری نفت و گاز، تغییر در کیفیت منابع آبی را گزارش کرده و ادعا می‌کنند که شکست هیدرولیکی مسئول اصلی این تغییرات است. نگرانی‌های دیگر در این ارتباط به رقابت آب برای انجام فعالیت‌های شکست هیدرولیکی و سایر کاربران آب، بویژه در مناطقی که با تجربه خشکسالی و مشکلات دفع پساب‌های تولیدی حاصل از شکست هیدرولیکی بر می‌گردد.

بر این اساس کنگره ایالات متحده از آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA) درخواست کرد که در مطالعه‌ای ارتباط میان شکست هیدرولیکی و منابع آب آشامیدنی را مورد ارزیابی قرار دهد. در ادامه خلاصه‌ای از این گزارش آمده است.

## شکست هیدرولیکی

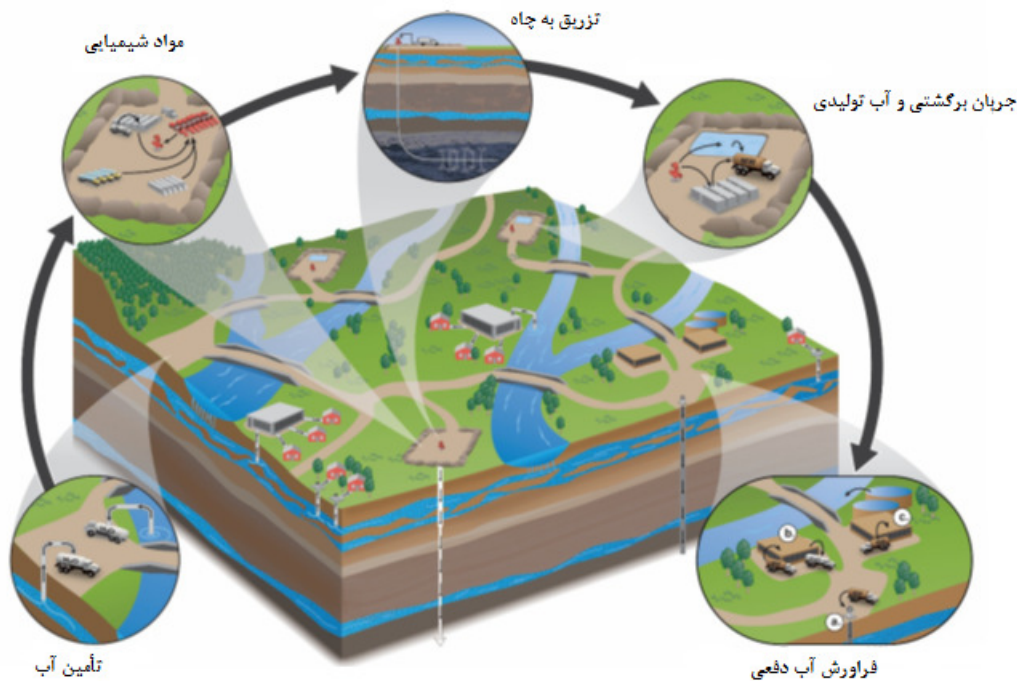
شکست هیدرولیکی، یک تکنولوژی تحریک چاه به منظور افزایش تولید نفت و گاز از سازندهای فشرده زیرزمینی است و شامل تزریق سیال با فشار بسیار بالا برای شکست سنگ مخزن است. این سیال شامل آب، مواد شیمیایی و پروپانت (معمولاً شن یا ماسه) می‌باشد و در سازندهای زیرزمینی شکاف ایجاد می‌کنند. نفت و گاز از طریق شکاف‌ها جریان پیدا کرده و به سطح می‌رسند.

شکست هیدرولیکی از اواخر دهه ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفته و در ۵۰ سال اول بیشترین مورد استفاده آن در چاه‌های عمودی بوده است. لیکن پیشرفت‌های تکنولوژیکی (از جمله حفاری افقی و جهت‌دار) موجب بکارگیری این روش در سازندهای هیدروکربونی غیر متعارف که تولید آنها در غیر این صورت سودآور نیست، نیز شده است.

## محدوده ارزیابی

محدوده این ارزیابی فعالیت‌های چرخه‌ی آب در شکست هیدرولیکی است (شکل ۱) و اطلاعات مربوط به اثر شکست هیدرولیکی را بر منابع آب آشامیدنی در هر مرحله از چرخه آب شکست هیدرولیکی بررسی و تحلیل می‌کند. چرخه آب شکست هیدرولیکی شامل موارد ذیل می‌باشد:

- تأمین آب: برداشت آب از آبهای سطحی یا زیرزمینی به عنوان مهم‌ترین جزء سیال تزریقی
- مواد شیمیایی: مخلوطی از آب، مواد شیمیایی و پراپنت برای تولید سیال شکست هیدرولیکی
- چاه تزریقی: تزریق سیال شکست هیدرولیکی به چاه برای شکست سازند زمین‌شناسی
- جریان برگشتی و آب تولیدی: بازگشت سیال تزریق شده و آب تولیدی از سازند به سطح و انتقال آن به واحدهای تصفیه و فرآورش
- فرآورش آب دفعی: استفاده مجدد، فرآورش و یا تخلیه پساب بازگشتی یا دفع مواد زائد تولید شده



شکل ۱: مراحل چرخه آب در شکست هیدرولیکی

ساختار کلی گزارش به این صورت است که پس از توضیح هر مرحله، تعدادی سؤال مطرح شده و همراه با ارائه شواهد به آنها پاسخ داده می‌شود.

### مجاورت فعالیت‌های شکست هیدرولیکی و منابع آب آشامیدنی

هزاران چاه در هر سال در ایالات متحده تحت فرآیند شکست هیدرولیکی قرار می‌گیرند. برآورد EPA حاکی از آن است که بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ تعداد ۲۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ چاه جدید حفر شده که در آنها شکست هیدرولیکی انجام شده است. ضمن آنکه در چاه‌های موجود (چاه‌هایی که بیش از یک سال از عمر آنها گذشته است) نیز از این تکنولوژی استفاده شده است. بین ۱۹۹۰ و ۲۰۱۳ حداقل در ۲۵ ایالت شکست هیدرولیکی انجام گرفته است. تحلیل آژانس ۲۰ ایالت و کمی بیش از ۴۰۰ چاه را مورد نظر دارد. قیمت نفت و گاز در کوتاه‌مدت از عوامل موجب بروز نوسان در تعداد چاه‌های حفر شده با ساختار شکست هیدرولیکی بوده است و انتظار می‌رود که توسعه شکست هیدرولیکی ادامه و تولید نفت و گاز داخلی در دهه‌های آینده افزایش یابد.

احتمال زیادی وجود دارد چاه‌هایی که در آن شکست هیدرولیکی انجام شده در نزدیکی مناطق مسکونی و منابع آب آشامیدنی واقع شده باشند. طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳، تقریباً ۹/۴ میلیون نفر در یک مایلی این چاه‌ها زندگی می‌کردند. تقریباً ۶۸۰۰ منبع از منابع آب آشامیدنی در یک مایلی چاه‌هایی که در آنها شکست هیدرولیکی انجام گرفته است، قرار گرفته‌اند. این منابع آب آشامیدنی بیش از ۸/۶ میلیون نفر را در طول سال ۲۰۱۳ تأمین نموده است. اگر چه مجاورت فعالیت‌های شکست هیدرولیکی با منابع آب به خودی خود برای اثرگذاری کافی نیست، لیکن پتانسیل اثرات را افزایش می‌دهد.

### ۱- تأمین آب

آب از اجزای مهم فرآیند شکست هیدرولیکی است که بیش از ۹۰ درصد حجم مایع تزریقی به چاه را تشکیل می‌دهد. هر چاهی که در آن شکست هیدرولیکی انجام می‌شود به هزاران گالن آب نیاز دارد. طی سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲، فعالیت‌های شکست هیدرولیکی در ایالات متحده بطور متوسط ۴۴ میلیارد گالن آب مصرف کرده است. اگرچه این میزان آب کمتر از یک درصد کل آب سالانه مورد استفاده در ایالات متحده است، ولی برداشت آب می‌تواند بر کیفیت و کمیت منابع آب آشامیدنی در مقیاس‌های محلی اثر بگذارد.

## سؤالات پژوهش:

### انواع آب مورد استفاده در شکست هیدرولیکی کدامند؟

آب مورد نیاز برای شکست هیدرولیکی از آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و یا آب‌های دفعی برگشتی تأمین می‌شود. بطور کلی عملیات شکست هیدرولیکی در شرق ایالات متحده به آب‌های سطحی وابسته است در حالی که در بیشتر ایالات غربی نسبتاً کم آب، ترکیبی از آب‌های سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال در حوزه مارسلوس<sup>۱</sup> پنسلوانیا، بیشترین میزان آب مورد استفاده در شکست هیدرولیکی را آب‌های سطحی تشکیل می‌دهند در حالی که در حوزه نفتی بارنت<sup>۲</sup> تگزاس آب‌های سطحی و زیرزمینی در ابعاد تقریباً مساوی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مناطقی که با کمبود منابع آب سطحی روبرو هستند مانند تگزاس غربی، از آب‌های زیرزمینی بیشتر برای شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود.

در سر تا سر ایالات متحده اغلب آب مورد استفاد برای شکست هیدرولیکی، آب تازه است. اگر چه اپراتورها از آب با کیفیت پایین‌تر شامل آب دفعی شکست هیدرولیکی نیز استفاده می‌کنند که یک درصد از حجم تزریق آب را با درصد‌های متغیر در هر مکان شامل می‌شود. به عنوان مثال، استفاده مجدد از آب دفعی تقریباً ۱۸ درصد از حجم تزریق شده آب را در حوزه مارسلوس پنسلوانیا تشکیل می‌دهد در حالی که این میزان در حوزه نفت شیل بارنت تگزاس حدود ۵ درصد است.

### چه مقدار آب در هر چاه مورد استفاده قرار می‌گیرد؟

بر طبق تحلیل EPA، حجم متوسط آب مورد استفاده در هر چاه شکست هیدرولیکی تقریباً ۱/۵ میلیون گالن (۵/۷ میلیون لیتر) است. این برآورد با احتمال زیاد نشان‌دهنده طیف گسترده‌ای از انواع چاه‌های شکست هیدرولیکی شامل چاه‌های عمودی است که مقدار آب کمتری نسبت به چاه‌های افقی نیاز دارند. بنابراین اطلاعات انتشار یافته برای چاه‌های گاز شیل افقی بطور معمول بالاتر هستند (بطور مثال تقریباً ۴ میلیون گالن<sup>۳</sup>). همچنین طیف گسترده‌ای از ایالت‌ها حجم‌های مختلف آب را در هر چاه بکار می‌گیرند (از ۵ میلیون گالن (۱۹ میلیون لیتر) در آرکانزاس، لوئیزیانا و ویرجینیای غربی تا کمتر از یک میلیون گالن (۳/۸ میلیون لیتر) در کالیفرنیا، نیومکزیکو و اوتاوو). این تنوع ناشی از عوامل مختلفی از جمله طول چاه، سازند زمین‌شناسی و فرمول سیال شکست است.

### آب تجمعی مورد استفاده برای شکست هیدرولیکی چگونه می‌تواند کمیت آب آشامیدنی را تحت تأثیر قرار دهد؟

در مجموع، شکست هیدرولیکی نیازمند میلیاردها گالن آب در هر سال در مقیاس ملی، ایالتی و حتی محلی می‌باشد. با این حال استفاده زیاد از آب در شکست هیدرولیکی لزوماً به تنهایی تأثیری بر منابع آب آشامیدنی ندارد. بلکه تأثیرات از ترکیب آب مصرفی و آب در دسترس در مقیاس‌های محلی منتج می‌شود. علاوه بر این، دسترسی به آب به ندرت تحت تأثیر یک عامل به تنهایی قرار می‌گیرد. به عنوان مثال در

<sup>1</sup> - Marcellus Shale

<sup>2</sup> Barnett Shale

<sup>3</sup> Vengosh et al., 2014

لوئیزیانا، دولت عملیات شکست هیدرولیکی را با تغییر آب زیر زمینی به آب سطحی درخواست کرد که درخواست به دلیل بروز نگرانی‌هایی است که در مورد بروز اثرات نامطلوب برداشت آب از منابع آب زیرزمینی بر ذخایر آب آشامیدنی داشته است. نگرانی‌ها در مورد اثرات بالقوه بر منابع آب آشامیدنی در نتیجه برداشت آب در مناطقی زیاد است که مقدار آب نسبتاً بالایی برای شکست هیدرولیکی نیاز است در حالی که دسترسی به منابع آب در سطح پایینی قرار دارد. نگرانس غربی و جنوبی از جمله مثال‌هایی هستند که در آنها آب مورد نیاز برای شکست هیدرولیکی زیاد است در حالی که در این منطقه قابلیت دسترسی به آب بسیار پایین بوده و با تهدید خشکسالی و کاهش آب‌های زیرزمینی رو به رو است.

### تأثیر برداشت آب برای انجام شکست هیدرولیکی بر کیفیت آب چیست؟

برداشت آب به منظور انجام فرآیند شکست هیدرولیکی شبیه به تمامی برداشت‌های آب، تغییر کیفیت منابع آب آشامیدنی را در پی دارد. برداشت از منابع آب زیرزمینی بیش از نرخ شارژ طبیعی، ذخایر آب را در سفره‌های زیرزمینی کاهش داده و اجازه نفوذ آب با کیفیت پایین‌تر از سطح زمین یا سازندهای مجاور را به داخل این سفره‌ها می‌دهد. برداشت‌ها همچنین می‌توانند تخلیه آب‌های زیرزمینی را به داخل مسیرهای جریان کاهش داده و بصورت بالقوه بر کیفیت آب‌های سطحی اثر بگذارد. این در حالی است که مناطقی که در معرض خشکسالی قرار داشته و از آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌شوند، بیشترین تأثیر را خواهند پذیرفت. برداشت از آب‌های سطحی نیز بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارد. این برداشت‌ها می‌تواند سطوح آب را کاهش داده و مسیرهای جریان را تغییر دهند و لذا ظرفیت جریان را برای رقیق نمودن آلاینده‌ها دچار کاهش نمایند.

### ۲-مواد شیمیایی

سیالات بکار رفته در شکست هیدرولیکی از سه قسمت تشکیل شده‌اند که شامل ۱- مایع پایه؛ که بزرگترین جزء حجم سیال و معمولاً آب است ۲- مواد افزودنی؛ که می‌تواند ماده شیمیایی یا ترکیبی از مواد شیمیایی باشد ۳- پروپانت؛ مواد افزودنی برای یک هدف خاص (مانند تنظیم PH، افزایش ویسکوزیته، محدود کردن رشد باکتری) می‌باشند. مواد شیمیایی درصد کمی (معمولاً ۲ درصد یا کمتر) از کل حجم سیال تزریقی را تشکیل می‌دهند. از آنجا که بیش از یک میلیون گالن از مایعات در هر چاه تزریق می‌شوند، هزاران گالن مواد شیمیایی می‌تواند بصورت بالقوه در محل ذخیره شده و طی فعالیت‌های شکست هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد.

در محل ذخیره‌سازی، ترکیب مواد شیمیایی و سیالات شکست هیدرولیکی پتانسیل آن را دارد که بصورت تصادفی آزاد شده و محل را آلوده نمایند. اثرات بالقوه مواد شیمیایی بر منابع آب آشامیدنی ناشی از نشت سیال شکست هیدرولیکی و مواد شیمیایی با توجه به مشخصه‌های نشت، میزان انتقال و سمی بودن نشت مواد شیمیایی دارد.

### سؤالات پژوهش؛

#### چه میزان شناخت نسبت به شدت، مقدار و علل نشت سیالات شکست هیدرولیکی و مواد افزودنی وجود دارد؟

مقدار نشت در محل در نتیجه شکست هیدرولیکی تنها در دو ایالت اندازه‌گیری شده است. مقدار نشت از هر ۱۰۰ چاه در کلرادو تقریباً ۰/۴ و ۱۲/۲ برابر نشت در پنسیلوانیا است. با توجه به آنکه این اندازه‌گیری در سطح ملی انجام نشده است لذا به طور قطع نمی‌تواند گفت که این برآوردها نماینده آنچه هستند که در سطح ملی اتفاق می‌افتد. چنانچه این برآوردها نشانگر جزئی از کل باشند، تعداد نشت‌ها در سطح ملی در دامنه تقریباً ۱۰۰ تا ۳۷۰۰ نشت بطور سالیانه برای ۲۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ چاه جدید قرار می‌گیرند.

آژانس حفاظت از محیط زیست مقدار و علل نشت مواد شیمیایی را بر مبنای داده‌های موجود مورد شناسایی قرار داد. مقدار نشت‌ها بین ژانویه ۲۰۰۶ تا آوریل ۲۰۱۲ در ۱۱ ایالت ۱۵۱ مورد می‌باشند. مقدار این نشت‌ها در دامنه‌ای از ۵ گالن تا بیش از ۱۹۰۰۰ گالن (۱۹ تا ۷۲۰۰۰ لیتر) با حجم متوسط ۱۴۲۰ گالن (۱۶۰۰ لیتر) می‌باشد. علل نشت شامل خرابی تجهیزات، خطای انسانی، نارسایی تجهیزات جلوگیری از فوران چاه نفت، خوردگی‌ها، شکستگی شیرآلات و سایر موارد (مانند آب و هوا) می‌شود. البته بیش از ۳۰ درصد از ۱۵۱ مورد نشت ناشی از از واحدهای ذخیره‌سازی مایع (مانند مخازن، تانکرها و تریلرها) بوده است.

### نوع و حجم مواد شیمیایی مورد استفاده در سیالات شکست هیدرولیکی چه هستند و علت تفاوت آنها در میان مناطق مختلف چیست؟

در این ارزیابی لیستی از ۱۰۷۶ ماده شیمیایی مورد استفاده در سیال شکست هیدرولیکی مورد شناسایی قرار گرفته است. این مواد شیمیایی عبارتند از: اسیدها، الکل‌ها، ترکیبات آروماتیکی، بازها، پلی‌ساکاریدها و سورفکتانت‌ها. بر طبق تحلیل EPA، تعداد مواد شیمیایی در هر چاه در دامنه ۴ تا ۲۸ و بطور متوسط ۱۴ ماده در هر چاه می‌باشد.

تجزیه و تحلیل EPA حاکی از تفاوت در مواد شیمیایی مورد استفاده در هر چاه است و اینکه در هیچ یک از چاه‌ها الزاماً یک نوع ماده شیمیایی بکار نمی‌رود. بر طبق گزارش EPA، متانول، فرآورده‌های حاصل از تقطیر نفت سبک که با آب فرآوری شده‌اند و اسید هیدروکلریک در ۶۵ درصد یا بیشتر چاه‌ها بکار می‌روند. بر اساس این گزارش تنها ۳۲ ماده شیمیایی به استثنای آب، کوآرتز و کلرید سدیم در بیش از ۱۰ درصد چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب سیالات شکست هیدرولیکی با توجه به هر ایالت، هر چاه، هر شرکت پیمانکاری و سازندهای زمین‌شناسی متفاوت است. این تنوع به احتمال زیاد از عوامل مختلف شامل سازند زمین‌شناسی، در دسترس بودن و هزینه مواد شیمیایی مختلف و نیز ترجیح اپراتور متفاوت است.

بر آورد پایگاه داده‌های سازمان EPA حجم متوسطی از مواد شیمیایی را برای هر چاه با متوسط ۶۵۰ گالن (۲۵۰۰ لیتر) در هر مواد شیمیایی در هر چاه پیشنهاد می‌کند. بر پایه این متوسط و با فرض استفاده از ۱۴ ماده شیمیایی در هر چاه، بر آورد می‌شود که ۹۱۰۰ گالن (۳۴۰۰۰ لیتر) مواد شیمیایی ممکن است در هر چاه تزریق شود. تعداد مواد شیمیایی تزریقی در هر میدان از تقریباً ۲۶۰۰ تا ۱۸۰۰۰ گالن (۹۸۰۰ تا ۶۹۰۰۰ لیتر) را شامل می‌شوند.

### خصوصیات فیزیکی شیمیایی و سمیت مواد افزودنی شیمیایی در شکست هیدرولیکی چیست؟

خواص فیزیکی شیمیایی ۴۵۳ ماده شیمیایی از کل ۱۰۷۶ ماده شیمیایی مورد استفاده در سیال شکست هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این خصوصیات با توجه به قابلیت حرکت، میزان حلالیت و نوسان متفاوت هستند. از ۴۵۳ ماده شیمیایی که خصوصیات فیزیکی- شیمیایی آنها در دسترس بوده است، EPA، گزارش داده است که ۱۸ ماده از ۲۰ ماده‌ای که بیشترین قابلیت حرکتی را دارند در ۲ درصد یا کمتر چاه‌ها دیده شده است. کولین کلراید و هیدروکسی متیل به ترتیب در ۱۴ و ۱۱ درصد چاه‌ها گزارش شده‌اند. به نظر می‌رسد این دو ماده شیمیایی نسبتاً شایع‌تر بوده و اگر نشت شوند به سرعت از طریق محیط با جریان آب حرکت خواهند کرد. اغلب ۴۵۳ ماده شیمیایی به میزان زیادی با خاک و مواد شیمیایی آلی همراه می‌شوند. پتانسیل این مواد در آلاینده‌گی محیط طولانی مدت است. بسیاری از مواد ۴۵۳ ماده شیمیایی بطور کامل در آب حل می‌شوند ولی حلالیت آنها تا حد زیادی متفاوت است. تعداد کمی از مواد شیمیایی بخار شده و بخش بزرگی از مواد شیمیایی که در شکست هیدرولیکی به کار می‌روند تمایل دارند که در آب باقی بمانند.

به دلیل عدم دسترسی به داده‌ها برای اغلب مواد شیمیایی مورد استفاده در سیالات اطلاعات کافی برای شناسایی خطرات وجود ندارد لیکن اثرات آنها بر سلامت انسانی شامل تأثیر بر سیستم دفاعی بدن، تغییر در وزن بدن، انواع سرطان‌ها، تغییر در شیمی خون، مشکلات عصبی، سمیت کبدی و کلیوی و تأثیر بر تولید مثل از طریق دو معیار تشخیص ریسک بررسی شده است هر چند که بررسی خطرات و ریسک‌های همراه با این مواد افزودنی شیمیایی بویژه بر سلامت انسان‌ها فراتر از این ارزیابی قرار می‌گیرد.

### تأثیر نشت مواد شیمیایی بر آلودگی منابع آب آشامیدنی چیست؟

سازو کارهای متعددی وجود دارند که بواسطه آنها، نشت می‌تواند منابع آب آشامیدنی را آلوده کند و شامل جریان مواد شیمیایی از چاه به آب‌های سطحی، آلودگی خاک و انتقال و نفوذ در آب‌های سطحی و آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌باشند. از ۱۵۱ نشت شناسایی شده توسط EPA، سیالات در ۱۳ مورد به آب‌های سطحی (۹ درصد ۱۵۱ نشت) و ۹۷ مورد (۶۴ درصد) به خاک راه یافته‌اند. البته گزارش ادعا می‌کند که هیچ‌یک از نشت‌های مواد شیمیایی به آب‌های زمینی نفوذ نکرده‌اند هر چند که در بلندمدت ممکن است از طریق نفوذ در خاک به داخل آب‌های زیرزمینی ورود کنند. البته هر یک از ساز و کارها ممکن است به سرعت اتفاق بیفتند یا در دوره‌های کوتاه و بلند مدت به تعویق افتاده و یا اثری مداوم و مستمر در طول زمان داشته باشند. به طور مثال در کنتاکی، وقتی که سیالات شکست هیدرولیکی وارد رودخانه می‌شوند، نشت مواد شیمیایی به آب‌های سطحی به سرعت رسیده، بطور قابل توجهی PH آب را کاهش داده و قابلیت رسانایی آن را افزایش می‌دهد.<sup>۴</sup>

### ۳- تزریق به چاه

در فرآیند شکست هیدرولیکی، سیالات با فشار بسیار بالا به چاه‌های نفت یا گاز تزریق می‌شوند. این سیالات در قسمت زیر سطح چاه (معمولاً هزاران فوت زیر سطح) به منطقه تولید رسیده و در جایی که فشارهای تزریق سیال برای ایجاد شکاف در سنگ مخزن به اندازه کافی وجود دارد، جریان می‌یابند. تزریق سیال و ایجاد شکاف از دو طریق می‌تواند موجب آلودگی منابع آب آشامیدنی شود:

- ۱- حرکت ناخواسته سیالات مایع یا گاز به خارج از چاه تولیدی به سمت منبع آب آشامیدنی به دلیل نقص در پوشش لوله جداری و سیمان کاری
  - ۲- حرکت ناخواسته سیالات مایع یا گاز از منطقه تولید و سازندهای زیرسطحی به منابع آب آشامیدنی.
- البته ترکیبی از این دو ساز و کار نیز امکان‌پذیر است.

### سؤالات پژوهش:

#### روش‌های کنونی احداث چاه چه تأثیری بر سیالات- مایعات و گازها- قبل، حین و بعد از شکست هیدرولیکی دارند؟

چاه‌های تولیدی به منظور دسترسی به هیدروکربن‌های محبوس در زیر زمین و انتقال آنها به سطح احداث می‌گردند. همچنین در سراسر دهانه چاه، لوله جداری چندتایی کار گذاشته شده و سیمان کاری می‌گردد تا از ورود نفت و یا گاز طبیعی به لایه‌های دیگر که به سطح زمین متصل هستند، جلوگیری نماید.

<sup>4</sup> Papoulias and Velasco, 2013

منابع آب آشامیدنی زیرزمینی اغلب از طریق کار گذاشتن لوله جداری و سیمان کاری آن از چاه‌های تولیدی جدا می‌گردند. یکی از موارد مهم در احداث چاه‌های تولیدی به منظور جداسازی آنها از منابع آب شرب زیرزمینی، سیمانکاری لوله جداری است که مانع حرکت سیالات تولیدی (نفت، گاز و آب همراه) به سمت لایه‌های زیرسطحی می‌شود. مطالعه مدل‌سازی محدوده ریسک برای چاه‌های تزریقی انتخابی در داکوتای شمالی نشان می‌دهد، زمانی که لوله جداری سطحی تا پایین منابع آب شرب زیرزمینی ادامه داده می‌شود، نشت آب‌های آلوده به داخل لایه‌های دارای آب شرب زیرزمینی به حدود یک هزارم کاهش می‌یابد.<sup>5</sup> به منظور محافظت از منابع آب شرب زیرزمینی، اکثر چاه‌هایی که عملیات شکست هیدرولیکی بر روی آنها انجام شده است دارای لوله جداری و یک لایه سیمانکاری هستند. چنانچه لوله جداری به میزان کافی و یا سیمان کاری بطور مناسب طراحی و انجام نشود و یا در چاه صدمه ببینند، ممکن است باعث آلودگی منابع آب آشامیدنی از طریق سیالات یا گازهای تولیدی از چاه گردند. مثالهای متعددی وجود دارد که نقص در لوله جداری و سیمان کاری موجب آلودگی منابع آب آشامیدنی شده است. آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA) بر روی چاه‌های تولیدی نفت و گاز که توسط ۹ شرکت پیمانکاری خدمات چاه در فواصل سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ شکست هیدرولیکی انجام شده است، بررسی‌هایی انجام داده است. مطابق این بررسی‌ها حدود ۳ درصد از چاه‌ها (۶۰۰ حلقه از ۲۳ هزار حلقه چاه)، دارای نقص در سیمان کاری بوده‌اند و در برخی فواصل، سیمانکاری در پشت لوله جداری انجام نشده است. به عنوان مثال در داکوتای شمالی بخشی از رشته لوله جداری یک چاه در حین انجام عملیات شکست هیدرولیکی، دچار شکست و از هم گسیختگی شد و باعث ورود سیالات نفت و گاز به سطح زمین و منابع آب در نزدیکی لایه Killdeer گردید. در موارد دیگر نامناسب بودن سیمانکاری لوله جداری باعث آلودگی منابع آب شرب شده است. در ایالت اوهایو، نامناسب بودن سیمانکاری لوله جداری در حین انجام عملیات شکست هیدرولیکی، باعث بالا رفتن فشار گاز طبیعی در لایه‌های زیرزمینی اطراف چاه تولیدی گردیده و سرانجام باعث حرکت گاز طبیعی و ورود آن به منابع آب شرب این لایه‌های زیرزمینی گشته است.<sup>6</sup> در میدان گازی مام کریک در کلرادو، سیمانکاری نامناسب در یک چاه تولیدی باعث حرکت گاز متان و بنزن در داخل چاه تولیدی و ورود آن به منابع آب شرب زیرزمینی از طریق گسل‌های طبیعی و شکاف‌های موجود شده است.<sup>7</sup> این مثالها نشان دهنده چگونگی تأثیر "مسائل احداث چاه"، "فشار تحمل لوله جداری"، و "حضور گسل‌ها و شکاف‌های طبیعی" و تأثیر توأمان آنها در ایجاد آلودگی منابع آب شرب می‌باشند.

از سوی دیگر، انجام شکست هیدرولیکی در چاه‌های قدیمی احتمال آلودگی منابع آب شرب را با حرکت گازها و مایعات داخل چاه‌های تولیدی افزایش می‌دهد. همچنین احتمال آلودگی منابع آب رو زمینی با حرکت گازها و مایعات به خارج از چاه‌های تولیدی نیز افزایش می‌یابد. مطابق بررسی‌های آژانس محیط‌زیست آمریکا (EPA)، حدود ۶ درصد از ۲۳ هزار حلقه چاه تولیدی نفت و گاز انتخابی در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰، بعد از گذشت بیش از ۱۰ سال از حفاری در آنها شکست هیدرولیکی انجام شده است. اگرچه چاه‌های جدید را می‌توان مطابق با میزان تحمل فشارهای ناشی از شکست هیدرولیکی طراحی و احداث نمود، اما چاه‌های قدیمی برای انجام چنین عملیاتی (شکست هیدرولیکی) ساخته و تست نشده‌اند و از اینرو نمی‌توانند بدین منظور استفاده شوند. علاوه بر این، انجام عملیات شکست هیدرولیکی در چاه‌های با عمر بالا، ممکن است باعث تخریب و شکافته شدن لوله جداری گردد. از طرف دیگر میزان مجاورت لوله جداری با سیالات خورنده همانند سولفید هیدروژن، دی اکسید کربن و آب‌های شور نیز می‌تواند این تخریب را سرعت بخشد.

<sup>5</sup> Michie and Koch, 1991

<sup>6</sup> Bair et al., 2010; ODNr, 2008

<sup>7</sup> Science Based Solutions LLC, 2014; Crescent, 2011; COGCC, 2004



### مهاجرت سیالات زیرسطحی به داخل منابع آب آشامیدنی در چه نوع ساختار زمین‌شناسی اتفاق می‌افتد؟

بطور کلی جداسازی فیزیکی بین منطقه تولیدی و منابع آب آشامیدنی می‌تواند از منابع آب محافظت کند. عملیات شکست هیدرولیکی معمولاً در سازندهای با عمق زیاد انجام می‌گیرد، همانند لایه رسی مارسلوس یا لایه رسی هاینس ویل (لوئیزیانا/تگزاس) که فاصله عمودی مابین لایه حاوی منابع آب آشامیدنی و لایه رسی موردنظر ممکن است یک مایل و یا بیشتر باشد. مدل‌های عددی و مطالعات لرزه‌نگاری در مقیاس کوچک بر روی لایه رسی نشان می‌دهند که شکاف‌ها و گسل‌های ایجاد شده در عملیات شکست هیدرولیکی در چنین سازندهای عمیقی، ظرفیت نفوذ به داخل لایه‌های حاوی منابع آب را نداشته و لذا آب را آلوده نخواهد کرد.

البته تمامی لایه‌هایی که در آنها شکست هیدرولیکی انجام می‌شود در زیر لایه‌های منابع آب واقع نشده‌اند. بطور مثال لایه رسی آنتریم (در میشیگان) و لایه رسی نیو آلبانی (در ایلینویز/ایندیانا/کنتاکی) در لایه‌های کم عمق‌تر (۱۰۰ تا ۱۹۰۰ فوت معادل ۳۰ تا ۵۷۹ متر) با اختلاف فاصله عمودی بسیار کم نسبت به لایه‌های حاوی منابع آب آشامیدنی واقع شده‌اند. آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA) بر روی چاه‌های تولیدی نفت و گاز که توسط ۹ شرکت پیمانکاری خدمات چاه در فواصل سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ شکست هیدرولیکی انجام شده است، بررسی انجام داده است. مطابق این بررسی‌ها در ۲۰ درصد از ۲۳ هزار چاه مورد آزمایش، فاصله کم عمق‌ترین لایه‌ای که شکست هیدرولیکی بر روی آن انجام شده با منابع آب زیرزمینی کمتر از ۲۰۰۰ فوت (۶۱۰ متر) بوده است.

علاوه بر این، برخی لایه‌های زیرزمینی وجود دارند که هم حاوی منابع نفت و گاز و هم حاوی منابع آب آشامیدنی می‌باشند. شواهد نشان می‌دهد که در این لایه‌ها نیز شکست هیدرولیکی انجام شده است. سیالات مورد استفاده در شکست هیدرولیکی ممکن است بر روی آب‌هایی که هم اکنون و یا بعد از این مورد مورد استفاده قرار می‌گیرند، تأثیر گذاشته و آنها را آلوده کنند. بر مبنای بررسی‌های انجام شده، وقوع این عمل به ندرت بوده و موارد موجود نیز اغلب در برخی مناطق غرب ایالات متحده متمرکز بوده‌اند. از آنجا که برخی سیالات تمایل به باقی ماندن در لایه‌های زیرزمینی را دارند، نفوذ سیالات مورد استفاده در شکست هیدرولیکی به لایه حاوی منابع آب آشامیدنی، مستقیماً بر روی کیفیت آب تأثیر خواهند داشت. بدین ترتیب شکست هیدرولیکی بر لایه‌های حاوی منابع آب شرب دارای تأثیر کوتاه مدت به دلیل مصرف روزانه مردم و بلند مدت به دلیل خشکسالی و یا هرگونه تغییر شرایط و ایجاد ضرورت در استفاده از آب این لایه‌ها برای مصرف در آینده می‌باشند.

حرکت گاز و مایع از لایه‌های تولیدی به منابع آب شرب زیرزمینی از طریق چاه‌های تولیدی یا چاه‌های تزریقی دیگر که در نزدیکی محل انجام عملیات شکست هیدرولیکی قرار دارند، نیز می‌تواند انجام شود. شکاف‌های ایجاد شده در عملیات شکست هیدرولیکی ممکن است چاه‌های نزدیک و یا شبکه شکاف‌های طبیعی موجود را قطع نموده و سیالات به این چاه‌ها جریان یابند. این ارتباطات زمانی بسیار خوب شکل می‌گیرند که چاه‌ها به یکدیگر نزدیک بوده و یا بر روی یک سکوی سرچاهی قرار گرفته باشند. در لایه رسی وودفورد در اوکلاهاما، احتمال ارتباط چاه‌هایی که در فواصل بیش از ۴۰۰۰ فوتی (۱۲۱۹ متری) از هم قرار داشته‌اند، کمتر از ۱۰ درصد بوده است. اما در چاه‌هایی که فاصله آنها از یکدیگر کمتر از ۱۰۰۰ فوت (۳۰۵ متر) بوده، احتمال ارتباط آنها به بالای ۵۰ درصد رسیده است.<sup>۸</sup> اگر یک چاه حاشیه‌ای تحمل تنش‌های ناشی از شکست هیدرولیکی چاه مجاور را نداشته باشد، اجزاء چاه ممکن است دچار شکستگی شده و در نتیجه سیالات از سطح و

<sup>8</sup> Ajani and Kelkar, 2012

توسط این چاه به منابع آب آشامیدنی راه یابند. براساس حوادث گزارش شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا، نشت سطحی سیالات شکست هیدرولیکی به ارتباط چاهها با یکدیگر نسبت داده می شوند.

چاههای قدیمی تر یا چاههای غیر فعال (شامل چاههای نفت و گاز، چاههای تزریقی و یا چاههای آب شرب) نزدیک به عملیات شکست هیدرولیکی، پتانسیل بالاتری برای ایجاد راههای ارتباطی برای آلودگی منابع آب شرب دارا می باشند. براساس مطالعه‌ای که در اوکلاهاما انجام شده است، اثرات منفی حاصل از شکست هیدرولیکی چاههای همجوار، آسیب بیشتری بر روی چاههای قدیمی تر خواهند داشت.<sup>9</sup> در برخی موارد چاههای غیرفعال موجود در محدوده انجام عملیات شکست هیدرولیکی به درستی متروکه نشده‌اند. برخی چاهها نیز قبل از سالهای ۱۹۵۰ متروکه شده اند که یا با سیمان بسیار کمی پر شده و یا عملیات متروکه سازی آنها بدون سیمان انجام شده است. براساس تخمین کمسیون بین ایالتی نفت و گاز، قبل از اینکه یک سیستم نظارتی رسمی و مناسب تدوین گردد، ممکن است بیش از یک میلیون چاه در ایالات متحده آمریکا حفاری شده باشد که موقعیت آنها ناشناخته بوده و وضعیت آنها هم اکنون مبهم می باشد.<sup>10</sup> برنامه‌هایی برای متروکه سازی استاندارد چاههای غیرفعال در حال اجرا است ضمن آنکه عملیات شناسایی چاههای مذکور و اجرای این برنامه‌ها بر روی آنها نیز در حال انجام است.

#### ۴- جریان برگشتی و آب تولیدی

آب با کیفیت متغیر محصول جانبی چاههای تولیدی نفت و گاز می باشد. بعد از شکست هیدرولیکی و برداشتن فشار تزریق سیالات از روی چاه، جریان برگشتی آب از چاه تولید می گردد. در ابتدا این آب همان سیال مورد استفاده در شکست هیدرولیکی است، اما با گذشت زمان ترکیب آن تحت تأثیر سیال داخل سازند قرار گرفته و رفته رفته سیال داخل سازند تولید خواهد شد. برخی مواقع در مراجع علمی، آب اولیه تولیدی بعد از شکست هیدرولیکی، جریان برگشتی نامیده می شود که در این تحقیق نیز از همین واژه استفاده می شود. همچنین سیالات شکست هیدرولیکی و هر نوع آبی که از سازند به سطح بر می گردد، در مجموع آب تولیدی گفته می شود.

مقدار آب تولیدی متغیر است ولی معمولاً به طور متوسط ۱۰ تا ۲۵ درصد از حجم تزریق وابسته به مقدار زمان سپری شده از لحظه شکست و همچنین خصوصیات چاه موردنظر می باشد. با این حال استثناهایی نیز در این مورد وجود دارد، مثلاً کل حجم آب تولیدی در لایه رسی بارنت در نگزاس، برابر و یا حتی بیشتر از حجم تزریق شده در شکست هیدرولیکی است. در ابتدا نرخ جریان به طور کلی بالا بوده و سپس با گذشت زمان و تولید نفت و گاز، نرخ جریان کاهش می یابد.

آلوده شدن منابع آب آشامیدنی می تواند با ورود و یا نشت آب تولیدی به داخل آب‌های سطحی یا آب‌های زیرزمینی رخ دهد. انتقال محیطی ترکیبات مواد شیمیایی موجود در آب تولیدی به خصوصیات نشت (مانند حجم و مدت زمان نشت)، ترکیب سیال نشت شده و خصوصیات محیط اطراف بستگی دارد.

#### سوالات پژوهش:

وضعیت شدت و علل نشت از جریان برگشتی و آب تولیدی به محیط چگونه است؟

<sup>9</sup> Ajani and Kelkar, 2012

<sup>10</sup> IOGCC, 2008

آب تولیدی از چاه‌هایی که در آنها شکست هیدرولیکی انجام شده است به محیط اطراف وارد شده و نشت می‌کند. همانطور که در بخش مواد شیمیایی بحث شد، فرکانس نشتهای درون سایتی حاصل از عملیات شکست هیدرولیکی چاهها در دو ایالت آمریکا قابل تخمین می‌باشد اما در کل کشور ممکن نیست. فرکانس نشت در سایت‌ها برای تمامی سیالات شامل آب تولیدی در ایالت‌های کلرادو و پنسیلوانیا حدود ۰/۴ تا ۱۲/۲ حلقه چاه در هر یکصد حلقه چاه تخمین زده شده است. خارج از چاه، آب تولیدی می‌تواند از طریق خطوط لوله و ماشین آلات حمل و نقل نیز نشت نموده و منابع آب آشامیدنی را در معرض آلودگی قرار دهد.

آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA)، حجم نشت و علل نشت آب تولیدی در داخل و در اطراف ۲۲۵ حلقه چاه را مشخص نموده است. این نشت در فواصل ژانویه ۲۰۰۶ تا آوریل ۲۰۱۲ در ۱۱ ایالت رخ داده است. متوسط حجم گزارش شده نشت آب تولیدی، ۹۹۰ گالن (برابر با ۳۷۵۰ لیتر) بوده است که بیش از دو برابر نشت سیالات و مواد شیمیایی در حین عملیات شکست هیدرولیکی می‌باشد. علل نشت آب تولیدی در داخل و بیرون چاه به دلایل: خطای انسانی، خرابی تجهیزات، خرابی ماشین آلات حمل و نقل و نشت از آنها و برخی علل دیگر (همانند ارتباط چاه‌ها به یکدیگر) و یکسری دلایل ناشناخته می‌باشد. همچنین بیشترین حجم کلی نشت در تمامی ۲۲۵ چاه مورد بررسی، مربوط به خرابی ماشین آلات حمل و نقل بوده است.

### ترکیب شیمیایی جریان برگشتی حاصل از عملیات شکست هیدرولیکی و آب تولیدی چیست و چه عواملی بر این ترکیب اثرگذار خواهند بود؟

ترکیبی از پارامترهای مختلف بر روی ترکیب شیمیایی آب تولیدی تأثیرگذار می‌باشند. این پارامترها شامل این موارد می‌باشند: ترکیب شیمیایی سیالات تزریقی در عملیات شکست هیدرولیکی، نوع سازندی که شکست هیدرولیکی بر روی آن انجام می‌شود، فرآیندهای زیرسطحی در حین این عملیات، زمان ماند سیال در سازند. در ابتدای انجام عملیات، ترکیب شیمیایی آب تولیدی و به طور کلی سیال برگشتی، مشابه ترکیب شیمیایی سیال تزریقی می‌باشد (در واقع همان سیال با تغییر بسیار کمی بازمی‌گردد). اما با گذشت زمان، ترکیب شیمیایی آب تولیدی تحت تأثیر خواص ژئوشیمیایی سازند قرار گرفته و تغییر می‌نماید.

کیفیت آب تولیدی از آب شیرین به آب شور تغییر می‌یابد و می‌تواند تبدیل به آبی حاوی مقادیر بسیار زیاد آنیونها، کاتیونها، فلزات، مواد آلی و مواد پرتوزای طبیعی گردد. آب تولیدی از سازندهای رسی و سازندهای گازی فشرده، معمولاً حاوی مقادیر زیادی از مواد محلول (TDS) و ترکیبات یونی می‌باشد (ترکیبات یونی همانند برم، کلسیم، کلراید، آهن، پتاسیم، منگنز، منیزیم و سدیم). آب تولیدی همچنین حاوی فلزاتی از قبیل: باریوم، کادمیوم، کروم، سرب و جیوه، و مواد آلی همچون بنزن است. آب تولیدی از لایه‌های زغالی حاوی گاز متان، در مقایسه با دیگر انواع آب تولیدی دارای مقادیر بسیار کمی مواد محلول است، بویژه زمانی که این لایه‌های زغالی در مجاورت آب شیرین قرار گرفته باشند.

در بررسی انجام گرفته توسط EPA، در آب تولیدی حاصل از عملیات شکست هیدرولیکی، ۱۳۴ ماده شیمیایی شناسایی گردید. این مواد شامل مواد شیمیایی افزوده شده در مرحله اختلاط مواد شیمیایی و مواد شیمیایی آلی، مواد پرتوزا، فلزات، و سایر ترکیبات زیرسطحی سنگ سازند است که در فرآیند شکست هیدرولیکی به سیال تزریق شده اضافه گردیده‌اند. همچنین غلظت مواد شیمیایی موجود در آب تولیدی برای ۷۵ ماده از ۱۳۴ ماده شیمیایی ذکر شده بالا، اندازه‌گیری شده است.

اکثر داده های مربوط به ترکیبات موجود در آب تولیدی، متعلق به سازندهای رسی و لایه های زغالی حاوی گاز متان بوده و تعداد بسیار کمی از آنها متعلق به سازندهای فشرده همانند لایه های ماسه سنگی می باشند. ترکیب شیمیایی آب تولیدی باید از طریق نمونه گیری و آنالیز نمونه تعیین گردد، که هر دو دارای محدودیت هایی مانند چالش های موجود در دسترسی به تجهیزات تولید، و نیز مشکلات موجود جهت شناسایی ماده مورد تجزیه هدف، قبل از تجزیه و تحلیل و فقدان روش تحلیلی مناسب می باشند. اغلب داده ها مربوط به مواد شیمیایی غیر آلی است در حالی که داده های بسیار کمی از مواد آلی در دسترس می باشد. بر اساس گزارش مواد شیمیایی آلی بسیاری در شکست هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته اند اما برخی از این مواد هنوز شناسایی نشده اند. این عدم شناسایی به دلیل وجود محدودیت های تحلیل، حوزه مطالعه محدود و وجود برخی واکنش های زیرسطحی بررسی نشده، می باشند.

## ترکیبات آب تولیدی و جریان برگشتی حاصل از فرآیند شکست هیدرولیکی، دارای چه خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و خصوصیات سمی می‌باشند؟

ترکیبات شناسایی شده در آب تولیدی شامل مواد شیمیایی غیر آلی (کاتیونها و آنیونها، همانند: فلزات، شبه فلزات، غیر فلزات، و مواد رادیوکتیو)، مواد شیمیایی آلی و ترکیبات آن، و یکسری مواد نامشخص است. برخی از ترکیبات به آسانی همراه آب منتقل می‌گردند (مانند کلراید و برماید)، در حالیکه سایر ترکیبات به شدت به شرایط ژئوشیمیایی آب دریافتی وابسته هستند (مانند رادیوم و باریوم) که انتقال آنها به ارزیابی ویژگی‌های سایت موردنظر بستگی دارد. آژانس موفق به تعیین خصوصیات فیزیکی-شیمیایی واقعی و یا تخمینی برای ۸۶ ماده شیمیایی از ۱۳۴ ماده شیمیایی (معادل ۶۴ درصد) مشاهده شده در آب تولیدی شده است.

مواد شیمیایی سیالات شکست هیدرولیکی بر اساس خواص قابلیت حرکت، حلالیت و نوسان بر مواد شیمیایی آلی در آب تولیدی تأثیر گذاشته و وارد منابع آب آشامیدنی می‌شوند و یا این منابع را در معرض آلودگی قرار می‌دهند. به طور کلی خواص فیزیکی-شیمیایی نشان می‌دهد که مواد آلی شیمیایی موجود در آب تمایل کمتری به حرکت در محیط اطراف دارند و در صورت نشت، این مواد تمایل بیشتری به ماندن در خاک داشته و یا به صورت رسوب در نزدیکی محل‌های نشت باقی خواهند ماند. قابلیت تحرک پایین ممکن است باعث حلالیت بسیار کم آلاینده در آب‌های سطحی گردد. هرچند این مواد شیمیایی می‌توانند با رسوبات موجود در آب‌های سطحی منتقل گردند. خصوصیات شیمیایی مواد آلی با میزان شوری آب تولیدی تغییر می‌کند و میزان تأثیرگذاری آن به ماهیت شیمیایی آن بستگی دارد.

مواد شیمیایی همراه با آب تولید، دارای اثراتی بر سلامت انسان هستند که این اثرات شامل عوامل بیماری‌های سرطانی، ضعف سیستم ایمنی بدن، تغییر در وزن بدن، تغییر در ترکیبات شیمیایی خون، مسمومیت ریوی، مشکلات عصبی، مسمومیت کبدی و کلیوی، مسمومیت در سیستم تولید مثل، و تأثیر بر سیستم رشد و نمو انسان می‌باشند. با این حال ارزیابی هر خطر بالقوه برای جمعیت‌های انسانی نیازمند شناخت کامل و دانش کافی در مورد مواد شیمیایی موجود در سایت مورد بررسی است.

مواد شیمیایی موجود در آب تولیدی به دلیل تفاوت در فرمولاسیون سیال تزریقی و تغییر خواص زمین شناسی برای سازندها و چاه‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. بر این اساس در نظر گرفتن خطرات و ریسک‌های همراه با این مواد شیمیایی می‌تواند برای آن سایت خاص مفید بوده و فراتر از ارزیابی حاضر اثربخش باشد.

## در صورت نشت، آب تولیدی و جریان برگشتی حاصل از شکست هیدرولیکی چگونه بر آلودگی منابع آب آشامیدنی اثر گذار است؟

تأثیر آب تولیدی بر منابع آب آشامیدنی از طریق نشت و ورود آب تولیدی به این منابع آبی، بستگی به حجم نشت، مدت زمان، و ترکیب شیمیایی آن دارد. این اثرات با نشت حجم زیادتر، مدت زمان زیادتر نشت، و غلظت‌های بالای ترکیبات آلاینده آب تولیدی (مانند نمکها، مواد پرتوزای طبیعی و فلزات) تشدید شده و باعث آلاینده‌گی بیشتری می‌شوند.

بر اساس تحقیقات EPA، در ۸ درصد از ۲۲۵ آیتم مورد بررسی، آب سطحی آلوده شده است. این نشت تمایل به آلوده نمودن حجم بالاتری از آب آشامیدنی را داشته است. فوران چاه در برادفورد کانتی در ایالت پنسیلوانیا باعث نشت حدود ۱۰ هزار گالن (۳۸ هزار لیتر) آب تولیدی

به یکی از آبریزه‌های کریک توواندا شده است که برای ماهیگیری ماهی‌های قزل آلا در نظر گرفته شده بود. بالاترین حجم نشت رخ داده شده در این ارزیابی در داکوتای شمالی اتفاق افتاده است که در آن حدود ۲/۹ میلیون گالن (معادل ۱۱ میلیون لیتر) از آب تولیدی توسط یک خط لوله شکسته شده و آسیب دیده به آبهای سطحی راه یافته است.

## ۵- دفع پساب و مدیریت آن

عملیات شکست هیدرولیکی موجب تولید حجم بسیار زیادی آب تولیدی می‌شود که نیازمند یک مدیریت مناسب است. در این بخش به هر گونه آب تولیدی و آب حاصله در سایت مورد بررسی، پساب گفته می‌شود. بر اساس ارزیابی (Clark and Veil (2009)، همراه با نفت و گاز تولیدی از حدود یک میلیون چاه فعال در سال ۲۰۰۷، تقریباً ۲/۴ میلیون گالن (۹،۱ میلیون لیتر) پساب در هر روز نیز تولید شده است. اما در حال حاضر نمی‌توان به طور دقیق تعیین نمود که چه میزان از پساب مذکور مربوط به فرآیند شکست هیدرولیکی چاه‌ها می‌باشد به این دلیل که با افزایش عملیات شکست هیدرولیکی در یک منطقه، ممکن است حجم پساب حاصله به شدت افزایش یابد.

دفع پساب و مدیریت آن ممکن است به چندین روش مختلف بر منابع آب آشامیدنی تأثیر بگذارد، که شامل موارد ذیل است:

- عدم تصفیه مناسب پساب قبل از تخلیه آن به داخل آب دریافتی
  - نشت یا ورود تصادفی پساب از چاله ذخیره‌سازی در حین حمل و نقل آن
  - تخلیه غیرمجاز پساب‌ها
  - مهاجرت ترکیبات آلاینده پساب از طریق خاک
  - مدیریت نامناسب مواد باقیمانده در تصفیه پساب
  - تجمع ترکیبات آلاینده پساب در رسوبات آبریزه‌های نزدیک به تأسیسات تصفیه پساب (CWT) و
  - استفاده از روشهای عمومی تصفیه فاضلاب خانگی (POTW) برای تصفیه پساب‌های حاصل از شکست هیدرولیکی.
- البته با توجه به تزریق پسابهای حاصل از شکست هیدرولیکی به چاه‌ها و انتقال کنترل شده آنها به لایه‌های زیرزمینی، احتمال آلودگی منابع آب آشامیدنی توسط این پساب‌ها صفر می‌باشد.

## سوالات پژوهش:

**چه روش‌هایی برای تصفیه و دفع پساب حاصل از شکست هیدرولیکی وجود دارند و در کجا بکار گرفته شده‌اند؟**

پساب حاصل از شکست هیدرولیکی از طریق روشهای مختلف تصفیه می‌شوند که شامل موارد ذیل است:

- دفع از طریق تزریق به چاه‌های زیرزمینی (که چاههای دفع پساب نیز نامیده می‌شوند)
  - دفع از طریق حوضچه‌های تبخیر
  - تصفیه پساب در واحدهای تصفیه متمرکز (CWT)
  - استفاده مجدد آن با رهاسازی پساب به درون آبهای سطحی
  - استفاده مجدد بعد از تصفیه یا بدون تصفیه و یا
  - رهاسازی آن به سطح گسترده‌ای از زمین.
- در گذشته در ایالت پنسیلوانیا تصفیه پساب حاصل از شکست هیدرولیکی از طریق روش POWT انجام می‌شد اما با پیگیری آژانس حفاظت از محیط زیست، این روش برای پساب‌های حاصل از لایه‌های رسی مارسلوس در ایالت پنسیلوانیا به شدت کاهش یافت.

تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در خصوص فرآورش یا دفع پساب حاصل از شکست هیدرولیکی به وجود و یا عدم وجود تأسیسات تصفیه یا دفع آن و هزینه‌های ناشی از آن (از جمله هزینه‌های انتقال) وابسته می‌باشد. بررسی سازمان‌های دولتی در سال ۲۰۰۷ در این خصوص نشان می‌دهد که بیش از ۹۸ درصد از آب تولیدی در صنایع نفت و گاز از طریق تزریق به لایه‌های زیرزمینی، دفع و مدیریت می‌گردند.<sup>۱۱</sup> اطلاعات موجود نیز بیانگر آن است که چاه‌های دفعی اولین و مناسب‌ترین روش برای دفع و مدیریت پساب‌های حاصل از شکست هیدرولیکی در بسیاری از مناطق ایالات متحده است (مانند لایه‌های رسی بارنت). منطقه دارای لایه رسی مارسلوس در ایالت پنسیلوانیا یک استثنا است چرا که اکثر پساب تولیدی به دلیل عدم وجود چاه‌های دفعی کافی در این منطقه، مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر چه در تحقیق حاضر تأثیر استفاده از چاه‌های دفعی بر منابع آب آشامیدنی مورد بررسی قرار نگرفته است، ولی هرگونه تغییر در هزینه دفع یا وجود و عدم وجود چاه‌های دفعی می‌تواند بر تصمیمات مدیریتی احتمالی در خصوص پساب‌های حاصله تأثیر بگذارد.

پساب حاصل از انجام برخی عملیات‌های شکست هیدرولیکی به واحدهای تصفیه متمرکز فرستاده می‌شوند که ممکن است پساب تصفیه شده در آبهای سطحی رها شده و یا مجدداً در عملیات شکست هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرند. براساس اطلاعات موجود، استفاده از واحدهای تصفیه متمرکز پساب (CWT) برای تصفیه و استفاده مجدد از پساب حاصل از شکست هیدرولیکی منطقه دارای لایه‌های رسی مارسلوس، نسبت به سایر نقاط آمریکا بیشتر است. بسیاری از واحدهای تصفیه متمرکز پساب (CWT) ایالت پنسیلوانیا که پساب‌های شکست هیدرولیکی را تصفیه می‌نمایند، نمی‌توانند میزان رسوبات محلول کل (TDS) را به مقدار مورد نیاز کاهش دهند، لذا پساب خروجی از بسیاری از این تأسیسات برای استفاده مجدد به چاه‌هایی که شکست هیدرولیکی در آنها انجام می‌شود، فرستاده شده و در سطح زمین دفع نخواهند شد.

استفاده مجدد از پساب در عملیات شکست هیدرولیکی ممکن است به هیچ تصفیه‌ای نیاز نداشته باشد یا تصفیه مختصری مورد نیاز باشد و حتی ممکن است احتیاج به تصفیه کامل داشته باشد. شرکت‌های اپراتور، مقدار قابل توجهی (حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد) از پساب حاصل از لایه‌های رسی مارسلوس در ایالت پنسیلوانیا را مجدداً مورد استفاده قرار می‌دهند. در مناطقی دیگر، مقادیر کمتری از پساب مجدداً استفاده می‌شود (مانند لایه‌های رسی بارنت). در برخی سازندهای خاص نیز، همانند لایه‌های رسی باکن در داکوتای شمالی، هیچگونه استفاده مجددی از پساب انجام نمی‌شود.

در برخی موارد پساب‌ها برای برنامه‌های کاربردی زمین مانند آبیاری و یا پخش بر روی جاده جهت جلوگیری از یخ زدگی و یا ممانعت از ایجاد گرد و غبار استفاده می‌شوند. این قبیل استفاده‌ها باعث افزایش پتانسیل آلودگی آبهای سطحی در زمان بارندگی و حل ترکیبات آلاینده و در نهایت حرکت آنها به درون این آبها می‌گردد. براساس مطالعات انجام شده، مشاهده شده است که پخش شورابه‌های متعارف نفت و گاز بر روی جاده‌ها، باعث افزایش درصد فلزات در خاک و کلرید در آبهای سطحی می‌شود.

### نحوه عملکرد روشهای متعارف POTW و سیستم‌های تصفیه تجاری در حذف آلاینده‌های آلی و معدنی از پساب‌های شکست هیدرولیکی چگونه است؟

روشهای متعارف POTW، عملیات تصفیه را بر پایه فرآیندهای ساده انجام می‌دهند که برای کاهش و یا حذف غلظت‌های بالای رسوبات محلول کل (TDS) در پسابهای حاصل از شکست هیدرولیکی (با میزان شوری بالا) طراحی نشده و کاربرد ندارند هرچند که برخی ترکیبات و

<sup>11</sup>Clark and Veil, 2009

یا گروه های آلاینده خاص نظیر فلزات، نفت، چربیهای حاصل از رسوب شیمیایی و یا سایر فرآیندها را می توانند حذف نمایند. در برخی موارد پساب در واحدهای تصفیه متمرکز (CWT) تصفیه شده و برای تصفیه اضافی به واحدهای تصفیه عمومی (POTW) ارسال و تخلیه می گردند. استفاده از ترکیب همزمان دو روش CWT و POTW، برای جلوگیری از اثرات مضر بر فرآیندهای زیست محیطی بسیار مفید هستند.

در تأسیسات تصفیه متمرکز پساب با روش های تصفیه پیشرفته مانند اسمز معکوس، تقطیر حرارتی، فشرده سازی مکانیکی بخار، غلظت TDS کاهش یافته و آلاینده های شناخته شده ای که در پساب حاصل از شکست هیدرولیکی وجود دارند، تصفیه می شوند. به هر حال اطلاعات محدودی در زمینه ترکیبات شیمیایی پساب حاصل از شکست هیدرولیکی و به ویژه آلاینده های آلی وجود دارد از اینرو مشخص نیست که آیا سیستم های پیشرفته تصفیه، در حذف و از بین بردن این ترکیبات مؤثرند یا خیر.

### دفع آب تصفیه شده حاصل از پساب شکست هیدرولیکی به آب های سطحی، چه تأثیری بر تأسیسات تصفیه آب آشامیدنی خواهد گذاشت؟

چنانچه پساب حاصل از شکست هیدرولیکی بعد از یک تصفیه نامناسب به درون آب های سطحی تخلیه شود، احتمال آلودگی منابع آب آشامیدنی وجود خواهد داشت. عدم تصفیه مناسب پساب حاصل از شکست هیدرولیکی ممکن است غلظت رسوبات موجود (TDS)، غلظت برومید، کلرید و ید را در آب دریافتی افزایش دهد. به طور خاص برومید و ید ماده های گندزدایی هستند (که به عنوان محصولات جانبی تولید می شوند) که می توانند در حضور کربن آلی در واحدهای تصفیه آب آشامیدنی یا واحدهای تصفیه پساب تشکیل گردند. ضروری است که نظارت بر واحدهای تصفیه آب آشامیدنی برای کنترل و عدم تشکیل این مواد به درستی انجام شود، چراکه برخی از آنها سمی بوده و می توانند باعث بروز سرطان گردند.

مواد پرتوزا می توانند در پساب های حاصل از شکست هیدرولیکی لایه های رسی خاص که تصفیه مناسب بر روی آنها انجام نشده است، یافت شوند مانند لایه های رسی مارسلوس. براساس مطالعه ای که اخیراً توسط آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا انجام شده است<sup>12</sup>، در نمونه هایی که از سیال خروجی واحدهای تصفیه متمرکز (واحدهایی که پساب صنایع نفت و گاز را تصفیه می کنند) گرفته شده است، غلظت رادیوم بسیار بالا بوده و بالغ بر ده ها هزار پیکوکوریس در هر لیتر می باشد. همچنین غلظت آلفا و بتای ناخالص نیز صدها هزار پیکوکوریس ثبت شده است. رادیوم، آلفای ناخالص و بتای ناخالص نیز در سیال خروجی از واحدهای تصفیه عمومی مشاهده می شود. البته غلظت آنها در واحدهای POTW نسبت به واحدهای CWT کمتر است. همچنین در ایالت پنسیلوانیا تجمع رادیوم در رسوبات و خاک، در آبراه های خروجی برخی واحدهای تصفیه پساب های نفت و گاز، اعم از پساب های لایه های رسی مارسلوس و دیگر پساب ها، مشاهده شده است.<sup>13</sup> تحرک رادیوم از رسوبات و نحوه تأثیر آن بر روی کیفیت آب در پایین دست، شدیداً به نحوه جذب رادیوم توسط رسوبات بستگی دارد. اگر ساختار رسوبات متزلزل بوده و رادیوم به راحتی از آن جدا شود، آلودگی ممکن است اتفاق بیفتد. اما تاکنون هیچ شواهدی مبنی بر آلودگی رادیونوکلئیدی منابع آب آشامیدنی توسط پساب شکست هیدرولیکی تصفیه شده، مشاهده نشده است.

<sup>12</sup> PA DEP (2015b)

<sup>13</sup> PA DEP, 2015b; Warner et al., 2013a



پساب‌های حاصل از شکست هیدرولیکی حاوی ترکیبات دیگری مانند باریوم، بورون، و فلزات سنگین هستند. وجود باریوم در آب تولیدی همراه گاز در لایه‌های رسی اثبات شده است. ولی داده‌های بسیار کمی در خصوص غلظت فلز و ترکیبات آلی در پساب‌های تصفیه شده و تصفیه نشده وجود دارد تا بتوان ارزیابی نمود که آیا عملیات تصفیه و تخلیه پساب مؤثر بوده و تأثیری بر منابع آب آشامیدنی در پایین دست داشته است یا خیر.

### نتیجه‌گیری:

از طریق این ارزیابی ساز و کارهایی که از طریق آنها شکست هیدرولیکی بر منابع آب آشامیدنی تأثیر خواهد گذاشت، مورد بررسی قرار گرفته است. ساز و کارهای روی زمین می‌توانند بر منابع آب سطحی اثر بگذارند که شامل برداشت‌های آب در زمان‌ها و مکان‌هایی که دسترسی به آب کم است، نشت سیال شکست هیدرولیکی و مواد شیمیایی یا جریان آب تولیدی، تصفیه و فرآورش ناکافی پساب‌های شکست هیدرولیکی می‌باشند. ساز و کارهای زیر زمین شامل حرکت سیالات مایع و گاز از طریق چاه تولیدی به منابع آب آشامیدنی زیرزمینی و حرکت این سیالات از منطقه شکاف به این منابع از طریق مسیرهای ایجاد شده در سازندهای فشرده زیر سطحی می‌باشد.

شواهد بسیاری یافت شد که این ساز و کارها منجر به اثرات گسترده بر منابع آب آشامیدنی در ایالات متحده شده‌اند. از میان ساز و کارهای شناسایی شده در این گزارش، موارد خاصی یافت شد که یک یا بیشتر این ساز و کارها منجر به تأثیر بر منابع آب آشامیدنی شده‌اند که عمدتاً آلودگی منابع آب آشامیدنی را در پی داشته‌اند. نشت سیال شکست هیدرولیکی و آب تولیدی در موارد متعددی به منابع آب آشامیدنی سطحی رسیده است. تخلیه پساب حاصل از فرآورش ناکافی شکست هیدرولیکی، غلظت آلودگی را در آب‌های سطحی افزایش داده است. حرکت سیالات در زیر زمین از طریق چاه تولیدی منابع آب آشامیدنی را آلوده کرده‌اند. همچنین در برخی موارد، سیالات شکست هیدرولیکی بطور مستقیم در منابع آب آشامیدنی تزیق شده‌اند که عمدتاً به دلیل نفت و گازی است که بصورت همزمان در این سازندها وجود دارند.

با این حال تعداد موارد شناسایی شده که در نتیجه فعالیت‌های شکست هیدرولیکی، منابع آب آشامیدنی متأثر می‌شوند نسبت به تعداد چاه‌هایی که در آنها شکست هیدرولیکی انجام می‌شود نسبتاً کوچک است. چنین نتیجه‌ای می‌تواند منعکس‌کننده اثرات ناچیز این تکنولوژی بر منابع آب آشامیدنی باشد یا اینکه ممکن است تأثیر عوامل متعدد کمتر از واقعیت جلوه کند. علاوه بر این، اطلاعات قبل و بعد از شکست هیدرولیکی بر کیفیت منابع آب آشامیدنی ناکافی است که مانعی بر اندازه‌گیری دقیق اثرات خواهد بود. سایر عوامل محدودکننده شامل سایر عوامل آلودگی، زمان کوتاه مطالعه و عدم دسترسی به اطلاعات کافی مرتبط با فعالیت‌های شکست هیدرولیکی می‌باشد.

این ارزیابی علمی به درک اثرات بالقوه شکست هیدرولیکی بر منابع آب آشامیدنی و عواملی که ممکن است این اثرات را تشدید کند، کمک می‌کند. یافته‌های این ارزیابی نه تنها پاسخگوی نیاز دولت فدرال مقامات ایالتی و محلی است، درک بهتری را برای مردم به لحاظ آسیب‌پذیری منابع آب آشامیدنی از این قبیل فعالیت‌های همراه دارد. ضمن آنکه می‌تواند افق آینده این فعالیت‌ها را نیز ترسیم نماید که بر اساس آن راهکارهایی به منظور مدیریت این فرآیندها با در نظر داشتن آسیب‌های احتمالی آن ارائه گردد.