

آلودگی خاک

پاسخ به سوالاتی که در مورد مدیریت خطر در سایت‌های LNAPL مطرح است

مایعات نفتی بلوک اصلی ساختمان زندگی مدرن ما هستند، از آنها به عنوان سوخت، روان‌کننده و ماده خام بسیاری از محصولات مصنوعی استفاده می‌شود. در ایالات متحده آمریکا تخمین زده می‌شود ۸۴۰ میلیون گالن در روز مایعات نفتی مصرف می‌شود. مصرف کل در طی ۱۰۰ سال گذشته در حدود یک میلیون بار ۱۰ میلیون گالن است. رفاهی که در زندگی امروز ما به وجود آمده از همین مسئله ناشی می‌شود.

متاسفانه یکی از مشکلات جانبی این مسئله عدم توجه کافی به نشت مواد نفتی در محیط است. خوشبختانه نسبت این نشت به مقدار کل آنچه مصرف می‌کنیم بسیار کوچک است و بهبود ساختارها و الگوها به شدت پتانسیل نشت را در آینده کاهش می‌دهد. با این وجود خاک و آبهای زیرزمینی آلوده شده با مایعات نفتی، میراث استفاده ما از مایعات نفتی است. در طی ۳۰ سال گذشته، درک نیاز به نظارت بیشتر بر حفظ محیط زیست منجر به رشد سریع علوم و تکنولوژی مرتبط با مدیریت نشت مایعات نفتی شده است و مقالات، کتاب‌ها، دوره‌های کوتاه‌مدت، کنفرانس‌ها و صفحات اینترنتی بسیاری بدان اختصاص داده شده است. هم اکنون اطلاعات وسیعی در این زمینه وجود دارد اما مسئله‌ای که مطرح است به روز کردن و به روز نگه‌داشتن این اطلاعات است. هدف این مقاله فراهم کردن مروری فشرده و خلاصه بر دانش امروز در فرمت "پرسش‌هایی که اغلب پرسیده می‌شود" است.

به هر سؤال ابتدا پاسخی کوتاه داده شده و سپس برای کسانی که اطلاعات بیشتری نیاز دارند جزئیات بیشتر در کادر رنگی آورده شده است.

مسئله مهم این است که حین خواندن سوال‌ها و جواب‌هایی که در این مقاله آورده شده همواره به خاطر داشته باشید مدیریت کلی سایت تنها به تصمیم‌گیری راجع به خود مایعات نفتی خلاصه نمی‌شود بلکه باید سایر واسطه‌های مؤثر نیز به حساب آورده شود عواملی مثل روش‌های تماس (یعنی پولوم‌های هیدروکربنی حل شده و امکان رسیدن پولوم‌های بخار به مکان‌های بسته)

در این مقاله فرض بر آن است که خواننده دانش اولیه را راجع به چگونگی تشکیل پولوم‌های فاز بخار و حل شده، در نواحی مجاور منبع نشت مایعات نفتی داراست و نیز می‌داند که زوال طبیعی و سایر فرآیندها (طبیعی یا با دخالت انسان) چگونه تحرک و دامنه انتشار مایعات نفتی را محدود می‌کند.

LNAPL چیست؟

LNAPL یک نامگذاری ساده برای مایعات نفتی در خاک و آبهای زیرزمینی است و حروف اختصاری است که از ابتدای کلمات Light Non aqueous Phase Liquid گرفته شده است: Light بیانگر این واقعیت است که مایعات نفتی (با چند استثناء) دارای چگالی کمتر از آب هستند. "non aqueous" بر این نکته تاکید دارد که مایعات نفتی با آب مخلوط نمی‌شوند.

با جزئیات بیشتر، LNAPL از نفت خام مشتق می‌شود. LNAPL های مرسوم عبارتند از سوخت‌ها، روان‌کننده‌ها و خوراک اولیه برای ساخت بسیاری مواد.

از منظر محیط‌زیستی، مسائل کلیدی شامل موارد زیر است:

۱- LNAPL معمولاً در بالای منطقه آبهای زیرزمینی یافت می‌شود. شناوری LNAPL در آب مانع از مهاجرت و انتقال آن به داخل منطقه آبهای زیرزمینی می‌شود.

۲- اگر LNAPL و آب را ترکیب کنیم در هم مخلوط نمی‌شوند. این مواد غیرقابل امتزاج هستند. نتیجه آن است که اگر منطقه‌ای با LNAPL آلوده شود. آب موجود در خاک سهمی از فضاهای خالی خاک را به LNAPL می‌دهد. این شراکت در فضای خالی تحرک LNAPL را محدود و بازیافت آنرا دشوار می‌کند.

نشر LNAPL را باید بعنوان مسئله‌ای در نظر گرفت که در آن در حفره‌ها و فضاهای خالی چند فاز مایع وجود دارد. درک این مسئله برای یافتن راه حل موثری برای مقابله با نشر LNAPL بسیار ضروری است.

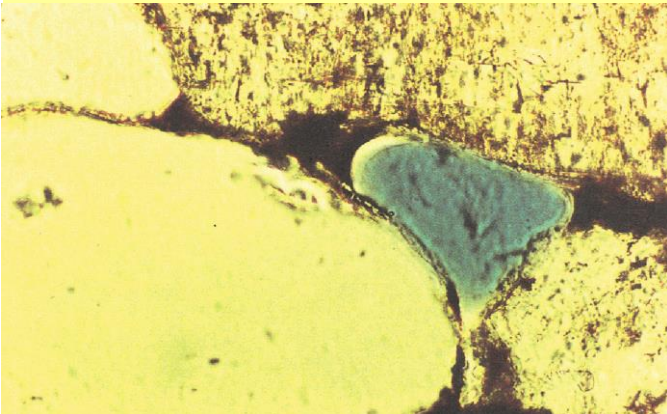
۳- LNAPL ترکیبی از مخلوط مولکول‌های آلی است که در آب بسیار کم حل می‌شود. زمانی که LNAPL در تماس با آبهای زیرزمینی قرار می‌گیرد مقادیر بسیار ناچیز و درصد کمی از مواد آلی در داخل آن حل می‌شود. اما همین مقدار نیز منجر به تجاوز از حدود استانداردهای کیفیت آب می‌گردد. یکی از مزایای حلالیت کم این است که آسیب به محیط‌زیست و اعمال فشار به آن بسیار کم خواهد شد و فرآیندهای طبیعی اغلب قادر به حذف آلودگی در فاصله کوتاه خواهند بود و از معایب حلالیت پایین این است که LNAPL می‌تواند برای مدتی طولانی بعنوان یک منبع آلوده کننده آب زیرزمینی باقی بماند.

LNAPL نشت یافته چه می‌شود؟

LNAPL نشت یافته تحت تاثیر نیروی ثقل به سطوح زیرین خاک نفوذ می‌کند، اجزاء فرار LNAPL، در بالای منطقه آبهای زیرزمینی به صورت Soil gas درآمده و در مجاورت نقطه نشر تشکیل پولوم‌های بخار می‌دهد. اندازه این پولوم‌های بخار بستگی به فرآیندهای حذف طبیعی بیولوژیکی و فیزیکی در آن محل دارد. در صورتیکه آلودگی سطحی باشد انتشار LNAPL به لایه زیرین به کندی صورت گرفته و در نهایت متوقف می‌شود. در صورتیکه مقدار نشر و نشت قابل توجه باشد LNAPL به منطقه آبهای زیرزمینی وارد خواهد شد و شروع به حل شدن در داخل آب می‌کند. با گذشت زمان، در مجاورت منبع نشر پولوم‌هایی از مولکول‌های نفت که در آبهای زیرزمینی حل شده‌اند تشکیل شده و در جهت پایین‌دست جریان شروع به پیشروی می‌کند. نوعاً این پولوم‌ها تحت تاثیر فرآیندهای بیولوژیکی در مسافت‌های کوتاه محدود شده و تقلیل می‌یابند. (در مسافتی حدود چند صد فوت). در نهایت بعد از گذشت زمان طولانی، اجزاء فرار خارج می‌شود و آنچه باقی می‌ماند مخلوطی از اجزاء با حلالیت کم و ویسکوزیته زیاد است.

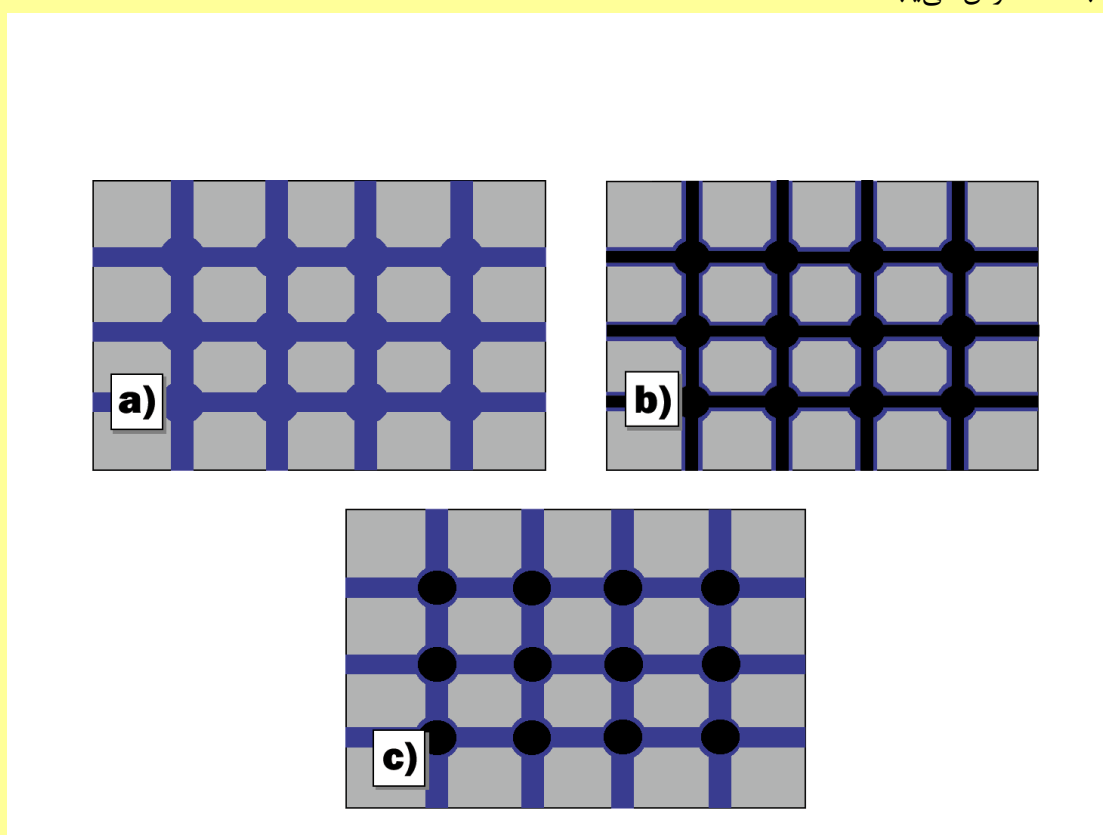
استنباط رایجی که از مسئله نشت LNAPL وجود دارد افزوده شدن مقداری نفت به یک مخزن آب است. نفت بالای آب شناور می‌ماند و با پمپاژ این LNAPL شناور، می‌توان عمل پاکسازی را انجام داد. معمولاً تصور می‌شود که به این طریق می‌توان LNAPL منتشر شده را تقریباً به طور کامل، پاکسازی نمود. بر پایه تحقیقات زیادی که در چند دهه اخیر در مورد تولید نفت و فیزیک خاک انجام شده است این مسئله با دقت نظر بیشتری مورد بررسی قرار گرفته است. دانستن مطالب زیر از لحاظ مدیریت نشت LNAPL ضروری به نظر می‌رسد.

لایه‌های زیرین سطح زمین را می‌توان به صورت یک حجم متخلخل (porous media) در نظر گرفت. این جسم متخلخل از دو جزء جامد (گرانول‌های خاک) و فضای خالی (حفره‌های درون خاک) تشکیل شده است. در بالای منطقه آبهای زیرزمینی در حفره‌های خالی خاک با آب و هوا بطور همزمان وجود دارد. آب ابتدا جذب می‌شود و یک پوشش پیوسته (فاز مرطوب wetting phase) در اطراف دانه‌های خاک ایجاد کرده و سپس حفره‌های خالی کوچکتر را پر می‌کند. بدین طریق کناره‌های حفره‌ها توسط آب اشغال شده و بخش مرکزی آن با هوا پر می‌گردد. (سیال غیر مرطوب)



شکل ۱- وجود چندین سیال در حفره‌های جسم متخلخل گرانولی (برگرفته از نتیجه تحقیقات Wilson و همکارانش، ۱۹۹۰)

LNAPL نشت یافته به سمت لایه های زیرین جاری می شود و در حد فاصل سطح تا منطقه آب های زیرزمینی به صورت فاز غیرمرطوب باقی می ماند. اگر حجم LNAPL نشت یافته زیاد باشد، LNAPL به محدوده آب های زیرزمینی خواهد رسید. در محدوده آب های زیرزمینی LNAPL آب را از فضای داخل حفره های بزرگ خارج کرده و جایگزین آن می شود. ورود انتخابی LNAPL به حفره های بزرگ بیانگر این واقعیت است که برای LNAPL بیرون کشیدن آب از حفره های بزرگ راحت تر از حفره های کوچک است. البته بعد از ورود LNAPL به محدوده آب های زیرزمینی، ابتدا شبکه به هم پیوسته ای از حفره های انباشته شده با LNAPL تشکیل می شود. در این حفره ها LNAPL توسط آب که فاز پیوسته ای را تشکیل داده احاطه می شود و سپس بعد از گذشت مدت زمان مشخصی ارتباط بین حفره ها قطع می شود. شکل ۲ این مطلب را شرح می دهد. در این شکل شبکه تخلخل بصورت ایده آل و منظم فرض شده است. جسم های جامد متخلخل دارای حفره هایی با اندازه های بسیار متفاوت هستند و در نتیجه LNAPL بسیار غیرهمگون تر از آنچه در این شکل آمده در شبکه گسترش می یابد.



شکل ۲: منطقه آب های زیرزمینی با توزیع پیوسته و غیرپیوسته (باقیمانده) LNAPL در ساختار شبکه ای ایده آل
با اینکه سیستم تشریح شده در بالا نسبتاً پیچیده است اما درک آن به منظور فهم مسائل مرتبط با LNAPL ضروری است. نتیجه اینکه:

- LNAPL روی سطح آب های زیرزمینی شناور نمی شود و همانند نفت شناور شده روی آب موجود در یک مخزن نخواهد بود بلکه همانند یک کوه یخ شناور در دریا بخش عظیمی از آن در داخل غوطه ور است. برای اینکه LNAPL داخل حفره ها قادر به حرکت باشد به فشاری نیاز دارد تا آبی که اطرافش را در داخل حفره احاطه کرده است بشکند.

- آب و LNAPL داخل هر حفره تحت فشارهای مختلف وجود دارند. اختلاف فشار بین LNAPL (فاز غیر مرطوب) و آب (فاز مرطوب) فشار موئینه (Capillary Pressure) نامیده می‌شود. این اختلاف فشار در شکل ۱ و در جایی که فاز غیر مرطوب (یعنی هوا یا LNAPL) تشکیل سطحی محدب داده به طوریکه جهت تحدب به سمت فاز مرطوب (یعنی آب) است قابل مشاهده می‌باشد. هرچه این فشار در فاز غیر مرطوب (یعنی LNAPL) بیشتر باشد فضای داخل حفره از فاز غیرمرطوب بیشتر پر می‌شود.
- فشار موئینه نتیجه اختلاف چگالی این دو مایع (آب و LNAPL) است $[P_c = (S_{LNAPL} - S_{water})\rho g]$ این خاصیت نقشی اساسی در توزیع و پتانسیل تحرک LNAPL در آب زیرزمینی بازی می‌کند.
- همانطور که LNAPL با حل شدن یا سایر مکانیسم‌های جداسازی تقلیل می‌یابد، فضایی که توسط LNAPL در حفره اشغال شده بود کاهش می‌یابد. با نقصان مقدار LNAPL مسیر عبور جریان کوچکتر و پر پیچ و خمتر می‌شود. این سهولت حرکت LNAPL را کاهش می‌دهد (تحرک) و در نهایت LNAPL به صورت قطره‌های مجزا و محدود شده‌ای در می‌آید که دیگر فاز پیوسته‌ای نبوده و در واقع فازی غیر پیوسته و غیر متحرک است. (شکل ۲c). حالت اشباعی که در آن LNAPL غیر متحرک است، اشباعیت باقیمانده (residual Saturation) نامیده می‌شود. عوامل غالب در حلالیت LNAPL در آب زیرزمینی و تبدیل به Soil gas در ادامه آمده است.

چه چیز پاکسازی LNAPL نشت یافته را با مشکل مواجه می‌سازد؟

تجربه چند دهه پیش به ما آموخته است که:

۱- با بهترین روش‌ها هم قادر به پاکسازی کامل محیط نخواهیم بود و همواره مقداری از LNAPL باقی خواهند ماند.

۲- مقادیر LNAPL باقی مانده اغلب سبب می‌شود که آب آشامیدنی نواحی آلوده، استانداردهای لازم را لحاظ نکنند.

محصور شدن LNAPL در حالت اشباعیت باقیمانده (همانطور که قبلاً شرح داده شد) فاکتوری اساسی در محدود کردن موفقیت‌ها در پاکسازی یک منطقه آلوده می‌باشد. سایر موانع شامل: نوسانات ارتفاع سطح آب (fluctuating water table elevation)، سرعت پایین انحلال LNAPL، ویسکوزیته بالای برخی LNAPLها، پیچیدگی جغرافیایی سطوح زیرزمینی، ساختمانها و تاسیساتی که دسترسی به سطوح زیرین را محدود می‌کند و پایین بودن غلظتی که در نهایت لازم است به آن رسید می‌باشد. سعی در پاکسازی یک منطقه آبخیز همانند آن است که بخواهیم همه صابون موجود در یک اسفنج را از آن خارج کنیم.

برای توضیح بیشتر، پاکسازی LNAPL همانند آن است که یک تکه اسفنج را در روغن بخیسانیم و آن را در یک اتاق تاریک قرار دهیم و سپس سعی کنیم آن را آنقدر تمیز کنیم تا آبی که برای شستشوی آن به کار می‌بریم قابل خوردن باشد، از لحاظ تکنیکی مشکلات موجود عبارتند از:

گیر افتادن LNAPL در حالت اشباعیت باقیمانده (Residual Saturations) در حفره های خاک: همانطور که گفته شد در اینحالت مولکولهای آب اطراف قطره های LNAPL را در داخل حفره ها احاطه می‌کند و هرچه مقدار LNAPL تقلیل می‌یابد مسیر عبور جریان LNAPL کوچکتر و پرپیچ و خمتر می‌گردد و این مسئله منجر به کاهش توانایی جسم متخلخل برای عبور دادن LNAPL از درون خود می‌شود. سرانجام از مقدار LNAPL به اندازه‌ای کم می‌شود که شبکه پیوسته جریان LNAPL دیگر وجود نخواهد داشت. در اینحالت اشباعیت غیر پیوسته خواهد بود (و در نتیجه غیر متحرک) که به این حالت اشباعیت باقیمانده گفته می‌شود. حرف آخر اینکه پمپاژ مستقیم LNAPL منجر به کاهش نرخ بازیافت با مرور زمان خواهد شد (باعث می‌شود به مرور زمان عمل بازیافت مشکلتر شود و در بهترین حالت فقط قادر به تقلیل جزئی از LNAPL نشت یافته می‌شود).

نوسانات ارتفاع سطح آب: نوسان ارتفاع سطح آب ناشی از شرایط فصلی، جزر و مدی یا سیکل‌های آب و هوایی مثل دوره های بارندگی یا خشک سالی بالاتر از حد متوسط است. بالا و پایین رفتن ارتفاع سطح آب منجر به پخش شدن LNAPL در سطح آب می‌شود. در چنین حالتی میزان تحرک LNAPL و تماس آن با گازهای خاک (Soil gases) تغییر می‌یابد. ارتفاع بالای سطح آب منجر می‌شود مقدار بیشتری از LNAPL بصورت قطرات ناپیوسته داخل حفره‌ها و زیر سطح آب گیر بیفتد (اشباعیت باقیمانده). در ارتفاع پایین سطح آب LNAPL گیر افتاده، قادر به خروج از منطقه غیر اشباع و تشکیل لایه ای از LNAPL که تحرک بیشتری دارد می‌شود. به این ترتیب راندمان کاهش LNAPL از طریق پمپاژ آن و یا گازهای خاک بسته به دوره های بالا و پایین رفتن ارتفاع سطح آب بسیار متفاوت خواهد بود.

سرعت پایین انحلال: کاهش و تقلیل LNAPL از طریق حلالیت در آب زیرزمینی و گاز خاک صورت می‌گیرد. به دلیل حلالیت پایین LNAPL در آب و جریان کند آب زیرزمینی مقدار انحلال آن در آبهای زیرزمینی بسیار کند است. جداسازی آن از طریق گاز خاک بدلیل تماس کم بین LNAPL و گاز خاک

(بیشتر LNAPL غوطه ور است) و نیز سیرکولاسیون محدود هوا در لایه های زیرین جسم تخلخل (خاک) محدود است.

ویسکوزیته بالای LNAPL ها: برخی LNAPL ها (مثل نفت خام) دارای ویسکوزیته هایی بین ۲۰ تا ۵۰ برابر بیشتر از آب هستند. در مکانهایی که این LNAPL ها به لایه های رسوبی با نفوذ بالا نشت می یابند بازیابی آن از طریق پمپاژ می تواند بسیار کند باشد. علاوه بر این، LNAPL با ویسکوزیته بالا معمولاً از اجزایی با نقطه جوش بالا تشکیل شده است. این اجزا حلالیت و فراریت کمی دارند در نتیجه تقلیل و جداسازی از طریق حلالیت یا فرارسازی بسیار کند صورت می گیرد.

پیچیدگی جغرافیایی لایه های زیرزمینی: لایه های طبیعی اغلب دارای جغرافیای پیچیده ای هستند. به طوریکه دو حفره که در دو منطقه با فاصله چند متر از هم حفر می شود می توانند شرایط بسیار متفاوتی از این لحاظ داشته باشند. پیچیدگی جغرافیایی یک منطقه بوسیله ساختار سطح هم تشدید می شود. اغلب ساختمانها، مخازن، واحدهای فرآیندی، یوتیلیتی و یا راههای جاده ای امکان تحقیقات و ایجاد ساختاری مناسب برای سیستم بازیابی را مشکل می سازد.

استانداردهای سختگیرانه: در بسیاری مناطق هدف نهایی باز گرداندن کیفیت آب زیرزمینی در منطقه تحت نشت به استانداردهای آب آشامیدنی است. به طور مثال زمانی که ماده نشتی بنزن باشد برای رسیدن به این هدف لزوماً باید همه LNAPL نشت یافته را بازیابی کرد.

بنا به همه دلایل اشاره شده در بالا، دسترسی به اهداف پاکسازی (یعنی لحاظ استانداردهای آب آشامیدنی) کار چندان آسانی نیست.

اگر در یک چاه (در منطقه آلوده) بتوان ضخامت لایه LNAPL را اندازه‌گیری کرد آیا می‌توان آنرا از طریق پمپ از زمین خارج نمود؟

عموماً این گونه تصور می‌شود که ضخامت لایه LNAPL در یک چاه شاخص مستقیمی از پتانسیل بازیابی است. محدودیتهای زیادی به این گونه برداشت از مسئله خدشه وارد می‌کند. مواردی مثل خواص جسم متخلخل، طبیعت لایه‌های رسوبی خاک، خواص فیزیکی LNAPL، گرادیانهای هیدرولیکی عمودی، شرایط غیر تعادلی و نوسانات سطح آب تفاوت‌های عمده‌ای بین حالت‌های مختلف ایجاد می‌کند. با توجه به این محدودیتها پاسخی که می‌توان به موارد سوال "آیا می‌توان LNAPL را با پمپاژ از دل زمین خارج کرد" داد استفاده از روشهای مختلفی است که در این مواد استفاده می‌شود.

اینکه آیا می‌توان LNAPL را با پمپاژ از دل زمین خارج کرد یا خیر را می‌توان از روشهای مختلفی مثل استفاده از مدلها (مثل آنچه charbeneau و همکارانش در سال ۱۹۹۹ عنوان کردند)، تستهای آزمایشگاهی (شرح داده شده در Sale، ۲۰۰۱) و جدول بندی پارامترهای ورودی برای مدلها تعیین نمود.

یافتن رابطه‌ای بین ضخامت LNAPL در یک چاه و حجم LNAPL نشت یافته، کار پیچیده‌ای است. شکل (۳) حالت ساده‌ای را که در آن LNAPL در یک جسم با تخلخل یکنواخت و با سطح پایدار آب منتشر می‌شود نشان می‌دهد. در بخش (۱) قسمت خاکستری رنگ منطقه‌ای است که LNAPL در آن تشکیل فاز غیر مرطوب پیوسته داده است. همانطور که مشخص است، عمق آلوده‌ای که در چاه مشاهده می‌شود پایینتر از منطقه آلوده است. در این منطقه (منطقه واقع شده بین آخرین آلودگی در خاک و لایه پایینی LNAPL در چاه) اختلاف فشار بین LNAPL موجود در چاه و آب واقع در منطقه، آنقدر نیست که قادر باشد آب را به خارج از این منطقه هل دهد. (فشار موئینه کمتر از فشار لازم برای جابجایی است) اینکه LNAPL در چاه چقدر بیشتر از منطقه آلوده پایین رود با ریزتر شدن دانه‌های خاک و اینکه چگالی دو مایع چقدر به هم نزدیک باشد افزایش می‌یابد.

شکل ۳- مفهوم ایده آلی از LNAPL موجود در یک چاه و منطقه آلوده مجاور
بخش ۲ نشان می‌دهد که در چاه فشار LNAPL و آب در فصل مشترک آب - LNAPL برابر است. بالاتر از این نقطه اختلاف بین فشار LNAPL و آب افزایش می‌یابد. توجه داشته باشید شیب خطوط فشار آب و LNAPL بدلیل آنکه دو مایع چگالیهای مختلفی دارند متفاوت است (فشار = چگالی سیال × ضریب ثقلی × ارتفاع)

همانطور که در بخش ۳ مشاهده می شود جزئی از فضای خالی که توسط LNAPL پر شده است (اشباعیت) بطور عمودی تغییر می یابد. با حرکت از سطح مشترک آب و LNAPL به سمت بالا اختلاف فشار بین LNAPL و آب افزایش می یابد. با ایجاد چنین تغییری اشباعیت نیز بیشتر می شود. کم شدن مقدار اشباعیت LNAPL در بخش بالایی بیانگر شرایطی است که در آن هوا نیز سهمی از فضاهای خالی برده و با آب و LNAPL در این فضاها شریک می شود.

اغلب شرایط ایده آلی ذکر شده در شکل ۳ وجود ندارد. اختلافاتی که معمولاً با حالت ایده آل مشاهده می شود در شکل ۴ آمده است. بخش ۱ حالتی را مطرح می کند که در آن چاه مونیتورینگ کاملاً وارد لایه های زیرین شنی با هر هیدرولیکی پاینتر می شود. فشار پایین این زیر لایه ها سبب می شود که LNAPL به پایین مکیده شود. در نهایت این شرایط باعث می شود در منطقه ای که در آن LNAPL تشکیل فاز پیوسته ای با ارتفاع چند فوت داده است ارتفاع LNAPL در چاه به ۳۰ فوت هم برسد. بخش ۲ حالتی را نشان می دهد که LNAPL زیر یک لایه ریز دانه قرار گرفته است. فشار در LNAPL هرگز به حدی نخواهد رسید که قادر به جابجا کردن آب از این لایه باشد. توجه داشته باشید که نفت خام در مخازن نفت طبیعی نیز به همین دلیل محصور می شود. از آنجا که در چاه، دیگر چنین نیروی مقاومی وجود ندارد LNAPL در چاه بالا آمده و بالاتر از ارتفاع واقعی می ایستد. در بخش ۳ فرض بر این است که LNAPL وارد یک منطقه ماسه ای ریزدانه شده است. در این حالت LNAPL تنها می تواند در شکاف سنگها، تونلهایی که توسط حیوانات حفر شده و موارد اینچنینی وارد و پخش شود در چنین حالتی بسیار مشکل است که ضخامت لایه داخل چاه بتوان مقدار نشت یافته را تخمین زد. این شرایط معمولاً در سواحل دریا مشاهده می شود.

شکل ۴: شرایط موثر در ضخامت LNAPL در چاهها

Charbeneau و همکارانش در ۱۹۹۹ و ۲۰۰۳ مدلی را تهیه کردند که بوسیله آن می توان قابلیت بازیافت LNAPL را برای شرایط ایده آلی که در شکل ۲ آمده است تعیین نمود. متن و مدل در سایت www.api.org/inapl موجود است. برای حالتهای پیچیده تر اغلب لازم است با تستهای پمپاژی و روشهای دیگر مقدار قابل بازیافت را ارزیابی نمود. این روشها در Sale(2001) بررسی شده است.

برای دانستن اینکه LNAPL در سطوح زیرین در حال حرکت است یا نه چه چیزهایی را در مورد منطقه باید بدانیم؟

زمانیکه در چاهها LNAPL مشاهده شود چیزی که معمولاً اهمیت می یابد این است که آیا LNAPL در حال حرکت است یا خیر. عموماً تا زمانیکه نشت LNAPL ادامه داشته باشد و منبع آن کور نشود LNAPL در سطوح زیرین حرکت می کند با متوقف شدن نشت، نیروی محرکه ای که باعث انتقال می شود کاهش یافته و سرعت حرکت و انتقال LNAPL کند می شود. با گذشت زمان نیروی محرکه به حدی کم می شود که دیگر نمی تواند LNAPL را حرکت دهد و این مساله زمانی اتفاق می افتد که فشار در LNAPL آنقدر نباشد که بتواند آب را از اطراف بدنه LNAPL نشت یافته جابجا کند.

مواد زیر می تواند جزئیات بیشتری را راجع به حرکت LNAPL مطرح کند.

حرکت LNAPL محتمل است اگر

- منبع نشت هنوز وجود داشته باشد (مثلاً نشت شدید از یک خط لوله یا تانک)
- LNAPL وارد آبهای سطحی شده باشد (یعنی تراوش به آبهای سطحی)

احتمال حرکت LNAPL وجود ندارد اگر :

- سیستم پمپاژی که در منطقه مشکوک به نشت و عملیاتی به کار گرفته شده است نرخ بازیافت نزدیک به صفر را نشان دهد. اگر نرخ بازیافت از چاهها و سیستم عملیاتی بازیافت صفر شود بدین معنی است که تقلیل و کاهش اشباعیت LNAPL به حدی رسیده است که LNAPL باقیمانده بیشتر بصورت فاز ناپیوسته غیر متحرک در آمده است. علاوه بر آن، می توان اینگونه نتیجه گیری کرد که وقتی گرادیان بزرگ ایجاد شده توسط پمپ قادر به حرکت دادن LNAPL نیست احتمالاً گرادیانهای طبیعی کوچکتر نیز نخواهند توانست آنرا به حرکت در آورند.
- گرچه مطالب ذکر شده در بالا برای تشخیص موقعیت مفید است اما در همه سایتها نمی توان به آن استناد کرد و در بعضی موارد تحلیلهای دقیقتری مورد نیاز است. بیان قانون داری برای جریان در یک جسم متخلخل بصورت زیر است :

نیروی محرکه \times ضریب هدایت برای LNAPL = سرعت نشت LNAPL

با بیان ریاضی خواهیم داشت :

$$V_{LNAPL} = - \left[\frac{kk_{LNAPL}}{\mu_{LNAPL}} \int_{l_{LNAPL}} \frac{g}{ns_{LNAPL}} \right] \left[\frac{dh_{LNAPL}}{dx} \right]$$

که V_{LNADPL} = سرعت تراوش LNAPL

K = نفوذ پذیری جسم متخلخل

K_3 LNAPL = نفوذ پذیری نسبی جسم متخلخل در برابر LNAPL

μ_{LNAPL} = ویسکوزیته LNAPL

ρ : چگالی LNAPL

n : تخلخل

g : ثابت ثقلی

S_{LNAPL} = جزئی از تخلخل که با LNAPL پر شده است.

h_{LNAPL} = ارتفاع LNAPL و

x = جهت جریان LNAPL

عبارت اولین گروه در سمت راست مساوی، بیانگر ظرفیت منطقه در هدایت LNAPL است. روشهایی برای تعیین این عبارت وجود دارد که در ادامه گفته خواهد شد. گروه دوم اثر نیروی محرکه را لحاظ می‌کند. با اندازه‌گیری ارتفاع سطح LNAPL در سه یا تعداد بیشتری چاه که در بدنه فاز پیوسته LNAPL حفر شده‌اند می‌توان پارامترهای لازم برای این عبارت را به دست آورد. با به کارگیری این تکنیک اغلب این نتیجه به دست می‌آید که در مناطق آلوده قدیمی تر سرعت حرکت LNAPL بسیار کندتر از آب زیرزمینی است. سرعت آب زیر زمینی بسیار کند است (حدود کمتر از ۱ فوت در روز) و سرعت حرکت LNAPL بسیار کمتر (چیزی حدود 0.1-0.01 فوت در روز).

اما در دوره نشت و زمانی که هنوز نقطه نشت کور نشده است به دلیل وجود نیروی محرکه زیاد (و تاثیر این پارامتر در رابطه بالا) سرعت حرکت LNAPL بیشتر از سرعت آب زیرزمینی خواهد بود. در نهایت همانطور که در معادله (۲) نیز مشخص است. سرعت نشت LNAPL با ویسکوزیته نسبت عکس دارد.

با گذشت زمان، آنچه از طریق سیستم بازیافت قابل استحصال است کاهش چشمگیری نسبت به نرخ بازیافت اولیه نشان می‌دهد، چگونه می‌توان فهمید که چه زمانی باید عملیات را متوقف کرد؟

با کاهش مقدار LNAPL در لایه های زیرزمینی، بازیافت آنچه باقیمانده است با گذشت زمان، مشکل و مشکلتر می‌شود و این مسئله منجر به کاهش مقدار قابل بازیافت با زمان شده و منحنی تجمعی بازیافت LNAPL برحسب زمان به صورت آنچه در شکل ۵ وجود دارد در خواهد آمد. در حالتی که برای بازیافت از پمپاژ مستقیم استفاده شود کاهش و تقلیل میزان LNAPL باعث هجوم آب به منطقه اشغال شده توسط LNAPL شده و این امر ظرفیت انتقال را کاهش داده و جریان بازیابی را کند می‌کند. بیان فیزیکی ایده آل برای این مسئله نشان می‌دهد که برای رسیدن به نرخ بازیافت صفر به زمان بی نهایت نیاز است (sale و Applegat ، ۱۹۹۷). در حالتی که از سیستم پمپاژ گازهای خاک (Soil gas) استفاده گردد، ابتدا بیشتر اجزاء فرار جدا می‌شوند و رفته رفته تماس بین LNAPL و گازهای خاک کاهش می‌یابد. در هر دو مورد بازیافت باید آنقدر ادامه یابد که آنچه بازیابی شده نسبت به آنچه باقیمانده قابل توجه باشد در ادامه این مطلب بیشتر شرح داده شده است.

شکل ۵- نمونه ای از منحنی تولید (بازیافت)

وقتی در چاهی LNAPL مشاهده می‌شد معمولترین کار این است که آنرا با پمپ خارج کنند. این کار ممکن است به روشهای بسیار متفاوتی مانند bailing ، استفاده از پمپهای کف گیر مخصوص و استخراج همزمان LNAPL ، آب زیرزمینی و یا گاز خاک صورت بگیرد. مقدار LNAPLی که از این روشها قابل بازیافت است بسیار متفاوت است (از یک گالن تا هزاران گالن). این تفاوتها به دلیل متفاوت بودن مقدار LNAPL منتشر شده و شرایط هیدرولوژیکی است. علی رقم این تفاوتها، بیشتر روشهای جداسازی و تقلیل LNAPL دارای خصوصیت‌های مشترکی به شرح زیر می‌باشند.

- آنچه که بازیافت می شود بسیار کمتر است از آنچه نشت یافته است (حدود $> \frac{1}{4}$) دلیل عمده آن این است که با انجام عملیات بازیافت و کاهش مقدار LNAPL در خاک، این ماده به صورت فاز ناپیوسته درون حفره های خاکی گیر افتد. عامل دیگری که عملیات بازیافت را محدود می کند ناهمگونی جغرافیایی خاک، کاهش تحرک LNAPL با کم شدن مقدار آن در خاک و محدودیتهای دسترسی فیزیکی به مناطق آلوده است.
 - کاهش نرخ بازیافت با زمان ربطی به مقدار آلودگی باقیمانده ندارد. به طور مثال، سیستم بازیابی که در شکل ۵ نشان داده شده است در بهترین حالت قادر به بازیافت $\frac{1}{4}$ از کل LNAPL موجود است.
 - به دلیل ارتباط پیچیده ای که بین ضخامت LNAPL موجود در یک چاه و مقدار قابل بازیافت آن در منطقه وجود دارد، اغلب با آنکه نرخ بازیافت به حد بسیار ناچیزی نزول کرده است اما هنوز LNAPL در چاه باقی مانده است. با اینکه ارتفاع فاز پیوسته LNAPL در ناحیه آلوده به حد صفر می رسد بسته به خصوصیات خاک مجاور چاه، ممکن است ضخامت LNAPL در چاه در حد چند اینچ تا چند فوت باشد. (شکل ۳ را ببینید)
- یک روش برای تعیین اینکه چه مقدار LNAPL در خاک باقی خواهد ماند تحلیل منحنی کاهش است. این روش در Sale(2001) تشریح شده است. این متن در www.api.org/inapl قابل دسترسی است.