Journal of Farayandno – Vol. 17 – No. 77 (2022): 91-113

Review Article

Industrial cleaning methods of oil sediments (sludge) from crude oil and products storage tanks

Masoumeh Hassanzadeh *
ACECR- University of Tehran, Chemical process design research group, Tehran, Iran

Received: 16 Mar 2022 **Accepted:** 21 Jun 2022

Abstract

This article is written with the aim of investigating the industrial cleaning methods of crude oil and products storage tanks and identifying the most efficient, safe and economical ones. For this perpose, the types of cleaning and recycling methods for oil sludge describe along with their advantages and disadvantages, then three widely used manual, automatic, and robotic methods discusse. The results show that the automatic cleaning system with powerful pumps is the fastest cleaning system, while the robotic method, where the presence of people inside the tank is not required at every stage, is the safest system. In terms of cleaning costs and environmental impact, automatic and robotic systems may be more expensive than manual methods, but due to the closed cleaning cycle, the ability to recover up to 95% of the sludge, income from the sale of recycle materials, they are the most cost-effective and environmentally friendly.

Keyword: Oil Deposits, Oil Storage Tanks, Industrial Cleaning Methods, Sludge.

* mhasanzad@ut.ac.ir

Please Cite Thise Article Using:

Hassanzadeh, M., “Industrial cleaning methods of oil sediments (sludge) from crude oil and products storage tanks”, Journal of Farayandno – Vol. 17 – No. 77, pp. 91-113, In Persian, (2022).

مقاله ترویجی

روش‌های صنعتی پاک‌سازی رسوبات نفتی (اسلج) از مخازن ذخیره نفت خام و فراورده‌ها

معصومه حسن زاده *

استادیار، گروه پژوهشی طراحی فرایندهای شیمیایی، جهاددانشگاهی، دانشگاه تهران

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۵ **پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۳/۳۱

چکیده

این مقاله با هدف بررسی روش‌های پاک‌سازی صنعتی تانک‌های ذخیره نفت خام درجهان و شناسایی کارآمدترین، ایمن‌ترین، اقتصادی‌ترین نگارش شده است. مقدمتا انواع روش‌های موجود برای پاک‌سازی رسوبات نفتی و بازیافت نفت به همراه مزایا و معایب بیان و سپس سه روش پرکاربرد یعنی روش دستی، روش اتوماتیک و روش رباتیک ازلحاظ کارآمدی، ایمنی، اثرات زیست‌محیطی و هزینه روش، مورد بحث و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که سیستم تمیزکاری اتوماتیک با پمپ‌های قوی سریع‌ترین سیستم تمیز کردن است، درحالی‌که روش رباتیک جایی که حضور افراد در داخل مخزن در هر مرحله لازم نیست، امن‌ترین سیستم است. از نظر هزینه‌های پاک‌سازی و تأثیرات زیست‌محیطی، سیستم‌های اتوماتیک و رباتیک ممکن است نسبت به روش دستی گران‌تر باشند اما به دلیل بسته بودن چرخه پاک‌سازی، توانایی بازیابی تا ۹۵ درصد نفت از لجن، درآمدزایی حاصل از فروش مواد بازیافت شده، مقرون‌به‌صرفه ترین و سازگارترین با محیط‌زیست است.

کلمات کلیدی: رسوبات نفتی، اسلج، تانک ذخیره، پاک‌سازی، لایروبی.

* mhasanzad@ut.ac.ir

استناد به مقاله:

حسن زاده ، م.، "روش‌های صنعتی پاک‌سازی رسوبات نفتی (اسلج) از مخازن ذخیره نفت خام و فراورده‌ها"، نشریه فرآیندنو، سال هفدهم، شماره ۷۷، صص. ۱۱۳-۹۱، (بهار۱۴۰۱).

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های بزرگ صنعت نفت حجم زیاد رسوبات نفتی انباشت شده در مخازن ذخیره نفت خام و فراورده‌های نفتی و تولید پسماندهای خطرناک و دفن نامناسب آن در محیط‌زیست یا استفاده‌های کم‌ارزش از آن‌هاست. ترکیبات سنگین نفتی که درته تانک‌های ذخیره رسوب می‌کنند و ازلحاظ گرانروی قادر به پمپ کردن نیستند را لجن نفتی یا همان اسلج می‌گویند. طبق گزارش علی رنجکش و همکاران در سال ۱۳۹۱، صنایع نفت در سراسر دنیا روزانه بیش از ۱/۴ میلیون بشکه لجن نفتی مخاطره‌آمیز برای محیط‌زیست تولید می‌کنند [۱]. در چین سالانه تقریبا بیش از ۲ درصد وزنی نفت خام یعنی حدود ۵ میلیون تن لجن در فرایندهای مختلف اکتشاف، انتقال، پالایش و ذخیره تولید می‌شود [۲].

لجن‌های نفتی جامدات ژلی چسبنده ویسکوزی هستند که در بافت ناهمگن آن مواد با ارزشی چون هیدروکربن‌های نفت، آب و جامدات آلی و معدنی وجود دارد. شکل ۱ تانک‌های ذخیره نفت خام و نمونه‌هایی از لجن نفتی را نشان می‌دهد.

شکل ۱- سایت تانک‌های ذخیره و نمونه‌های لجن نفتی [۱]

رسوبات نفتی چالش‌های بزرگی در صنعت نفت ایجاد می‌کند که به‌صورت اجمالی می‌توان به مهم‌ترین آن‌ها در زیر اشاره کرد.

- ✓ **کاهش ظرفیت مخازن:** با گذشت زمان عملیات ذخیره‌سازی نفت خام یا فراورده‌های نفتی باعث می‌شود ارتفاع لجن تشکیل‌شده در مخزن بیشتر و بیشتر شده و ظرفیت زیادی از حجم مخزن را اشغال کند و به مرور زمان امکان استفاده از مخزن کمتر شده و نهایتا به‌جایی می‌رسد که مخزن بلا استفاده و کنار گذاشته می‌شود. تجمع رسوبات و لجن حجم عملیاتی مخزن را برای ذخیره کاهش می‌دهد به‌گونه‌ای که در یک مخزن یک میلیون بشکه‌ای که حدود ۱۱۴ متر قطر و ۱۷ متر ارتفاع دارد، به‌طور میانگین طی یک دوره زمانی حدود ۷ سال، تقریبا ۱۸۰ هزار بشکه از ظرفیت مخزن به‌وسیله رسوبات اشغال می‌شود [۳].
- ✓ **آلودگی‌های نفتی و کاهش کیفیت نفت خام و فراورده‌ها:** ورود و خروج نفت خام تازه یا فراورده‌های نفتی به تانک ذخیره‌ای که دارای لجن نفتی باقیمانده از قبل است با کنده شدن و همراه کردن این رسوبات نفتی با نفت باعث آلودگی نفتی و همچنین ایجاد مشکل در ادامه مسیر می‌شود. به‌عنوان‌مثال در ارتباط بین مخزن و پالایشگاه در لوله‌های انتقال، پمپ‌ها وسایرتجهیزات پالایشگاهی گرفتگی ایجاد کرده و باعث اختلال و کندی عملیات می‌شوند [۴].
- ✓ **خوردگی تانک‌ها و هزینه‌های تحمیلی تعمیرات:** لجن‌ها باعث تسریع در خوردگی مخازن، لوله‌های انتقال و سایر بخش‌های درتماس می‌شوند. این رسوبات ته‌نشین شده معمولا سرعت خوردگی در کف مخازن ذخیره‌سازی را افزایش داده و هزینه بسیار زیادی باید صرف تعمیرات مخازن شود. سوراخ شدن تانک‌های

ذخیره یکی از معضلاتی است که صنعت نفت با آن روبه‌روست و باعث نشت نفت از این مخازن شده و درنتیجه تانک‌ها ازاین‌جهت نیاز به تعمیرات پیدا می‌کنند.

- ✓ **ایجاد هزینه‌های هنگفت پاک‌سازی و دفن پسماندها:** با توجه به حجم انباشت لجن‌های نفتی در ته تانک‌های ذخیره و نوع روش پاک‌سازی تانک ذخیره، هزینه‌های زیادی جهت لایروبی مخازن به صاحبان تانک تحمیل می‌شود.
- ✓ **آلودگی محیط‌زیست ناشی از دفن پسماندها:** سمیت و تأثیرات مخرب بر روی محیط‌زیست از دیگر مشکلاتی است که لجن‌ها به همراه دارند. به خاطر غلظت بالای مواد سمی موجود در لجن، دفع نامناسب آن‌ها می‌تواند تهدیدی جدی برای محیط‌زیست باشد.
- ✓ **کاهش درامد فروش نفت به خاطر هدر رفت هیدروکربن‌های باارزش نفتی در لجن:** در صورت استفاده از روش سنتی پاک‌سازی تانک‌های ذخیره، این مواد به‌صورت پسماند در زمین دفن یا استفاده ناچیزی از آن‌ها می‌شود که در حقیقت باعث هدررفت این مواد با ارزش نفتی می‌شود. امروزه دیگر لجن‌های نفتی به‌عنوان ضایعات محسوب نمی‌شوند بلکه به آن‌ها به‌عنوان یک ماده با اهمیت و با ارزش اقتصادی نگاه می‌شود و بر روی بازیافت نفت از لجن‌ها کارهای زیادی انجام شده است. می‌توان با این کار مواد با ارزش را دوباره به چرخه نفت بازگرداند. به عبارتی علاوه بر اینکه از مشکلات و معضلات رهایی می‌یابند لجن را نیز به یک محصول قابل‌فروش تبدیل می‌کنند.

با این اوصاف دارندگان مخازن نفت خام و فرآورده‌های نفتی موظف هستند جهت آزادسازی ظرفیت اشغال‌شده و بازدید از سطوح داخلی تانک برای تعمیرات احتمالی ناشی از خوردگی، طبق قوانین و مقررات استاندارد در طی برنامه‌های زمان‌بندی‌شده، آن‌ها را مورد بازرسی و پاک‌سازی قرار دهند. لجن‌های نفتی عموما تمام بخش‌های داخل تانک مانند کف، سقف، پایه‌های نگه‌دارنده سقف، لوله‌ها و لوازم جانبی مختلف را درگیر می‌کنند و می‌بایست کاملا پاک‌سازی شوند.

روش‌های متعدد برای پاک‌سازی تانک‌های ذخیره نفت خام در منابع علمی گزارش‌شده است که بعضی از آن‌ها صرفا بخش تکمیلی پاک‌سازی یعنی روش‌های بازیافت مواد نفتی از لجن است که به‌اشتباه به‌عنوان روش‌های پاک‌سازی عنوان‌شده‌اند و تنها تعداد معدودی از این روش‌ها جزو تکنیک‌های کاربردی به‌حساب می‌آیند. در بخش‌های بعدی به‌صورت مختصر هریک از این روش‌ها توضیح داده می‌شود اما انتخاب این روش‌ها تابع فاکتورها و شرایطی مهمی هستند که موردتوجه صاحبان شرکت‌های پاک‌سازی و صاحبان تانک‌های ذخیره می‌باشند. تعدادی از این فاکتورهای مهم عبارت‌اند از:

۱- سهولت فرایند پاک‌سازی
۲- تعداد کارگرانی که الزاما برای پاک‌سازی به داخل تانک وارد می‌شوند.
۳- مدت‌زمانی که هر کارگر داخل تانک سپری می‌کند.
۴- هزینه عملیات پاک‌سازی (پرسنلی، تجهیزات، حمل‌ونقل و ...)
۵- بازیافت ترکیبات نفتی از لجن
۶- زمان تعمیرات اساسی بودن تانک ذخیره

۷- شرایط انتقال، ذخیره یا دفن لجن‌ها و پسماندهای نفتی
۸- میزان ایمنی روش و کاهش خطرات و رعایت HSE
۹- درآمدزایی روش

هرکدام این فاکتورها دارای ضرایب تأثیر متفاوتی هستند که درمجموع ایمنی، کارایی، هزینه و تأثیرات محیط‌زیست هر روش، تعیین‌کننده انتخاب نهایی است.

۲- ترکیبات شیمیایی لجن‌های نفتی

قبل از ورود به بحث درباره روش‌های پاک‌سازی دانستن ترکیبات شیمیایی لجن‌های نفتی بسیار مهم و حیاتی است چون یکی از فاکتورهای مهم مقدماتی در انتخاب روش پاک‌سازی و بازیافت مواد آن است و بعدها نیز در تعیین نوع حلال نفتی و یا مواد شیمیایی برای مایع کردن لجن ویسکوز و جامد اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. ترکیبات شیمیایی لجن‌های نفتی قبل از آغاز عملیات پاک‌سازی با نمونه‌برداری و آنالیز مشخص می‌شوند.

ترکیبات شیمیایی لجن‌های نفتی هیچ‌گاه یکسان نیستند و کاملا بستگی به ترکیب شیمیایی نفت خام‌هایی دارد که به‌صورت منفرد یا مخلوط وارد تانک ذخیره می‌شوند. به‌عنوان‌مثال الفوتایسی و همکاران در سال ۲۰۰۷، ۵ نمونه لجن نفتی تانک ذخیره نفت خام در عمان را آنالیز کردند و متوسط درصد وزنی عناصر کربن (۳۷/۷۹)، هیدروژن (۶/۳۸)، نیتروژن (۰/۰۹۱)، گوگرد (۱/۳۸۸)، اکسیژن (۹/۵۵) و متوسط درصد وزنی آب (۱۷/۷۲)، خاکستر (۷/۶۲۳) و مواد جامد (۹/۴۸۸) گزارش کردند [۵]. حیدر زاده و همکاران در سال ۲۰۱۰ در ایران [۶] و منصور و همکاران در سال ۲۰۱۵ در لیبی [۷] بر روی چند نمونه لجن پالایشگاه آنالیزهای مانند تعیین درصد اجزای تشکیل‌دهنده لجن، تفکیک و شناسایی اجزا و برش هیدروکربنی آن‌ها را انجام دادند و نتایج آن در جدول شماره ۱ گزارش داده شده است.

جدول ۱- آنالیز لجن‌های نفتی تانک‌های ذخیره پالایشگاه لیبی و ایران (متوسط درصد وزنی) [۶،۷]

کشور	هیدروکربن کل (TPH)	برش هیدروکربن		آب	مواد جامد	ترکیبات جامد
		سبک فرار	سنگین غیر فرار			
ایران	۲۶/۵	قابل‌اغماض	۵۰ تا ۶۰ دیزل ۴۵/۲ سایر	۲۸/۳	۴۵/۲	-
لیبی	۴۲/۸	۳۰/۷	۶۹/۳	۲/۹	۵۴/۳	۷۰ ترکیبات آلی ۳۰ ترکیبات معدنی

مقایسه آنالیز لجن‌های دو کشور خیلی متفاوت است بطوریکه درصد متوسط وزنی هیدروکربن کل در لجن پالایشگاه لیبی تقریبا دو برابر لجن پالایشگاه ایران است ولی درصد وزنی آب در لجن پالایشگاه ایران تقریبا ۱۰ برابر لیبی است. دومین بخش مهم آنالیز لجن‌های نفتی تعیین درصد فلزات سنگین است و بحث خوردگی تانک‌ها در طول مدت ذخیره‌سازی و دفن پسماندها بعد از پاک‌سازی تانک‌ها به این بخش مربوط می‌شود. الفوتایسی و همکاران از کشور عمان و حیدر زاده و همکاران از ایران، در بررسی‌های خود روی نمونه‌های لجن، آنالیز فلزات سنگین نیز انجام دادند که نتایج آن در جدول شماره ۲ ارائه شده است [۵،۶].

جدول ۲- آنالیز فلزات سنگین لجن‌های نفتی توسعه نفت عمان و پالایشگاه نفت تهران (mg/kg)[۵،۶]

کشور	Zinc	Lead	Nickel	Cadmium	Chromium	Mercury
ایران	۶۱۰۰	۸۵۰	۲۷۰۰	۱۰۰	-	-
عمان	۲۷۸	۹۱	۷/۵	-	۱۲	۳/۵

تفاوت فاحش درصد فلزات سنگین نمونه‌های لجن دو کشور نشان از تفاوت طبیعت نوع نفت خام و لجن‌های باقیمانده آن‌ها درته تانک ذخیره دارد که قطعا تفاوت رفتار در نگهداری، سرویس و بازرسی تانک‌های ذخیره نفت خام ودفن پسماندها را می‌طلبد.

۳- روش‌های پاک‌سازی لجن نفتی

برای پاک‌سازی تانک‌های ذخیره نفت راه‌حل‌ها و روش‌های متعددی وجود دارند که بعضی روش‌ها همراه بازیافت مواد نفتی و بعضی بدون بخش بازیافت می‌باشند. روش‌های همراه با بازیافت، مناسب‌ترین و مطلوب‌ترین گزینه ازلحاظ اقتصادی و محیط زیستی است چون صنعت نفت را قادر می‌سازد که از این ماده باارزش دوباره استفاده کند و از طرفی با فروش مجدد مواد بازیافتی هزینه پاک‌سازی مخازن هم تأمین می‌شود. بعلاوه بازیافت لجن به کاهش حجم دفن پسماندهای نفتی کمک می‌کند و از افزایش آلودگی محیط‌زیست جلوگیری کرده و مصرف منابع انرژی غیرقابل‌تجدید را کاهش می‌دهد. به‌طورکلی لجن نفتی، که حاوی مقدار زیادی نفت و ترکیبات نفتی (بیش از ۵۰ درصد) و مقدار کمی جامدات (کمتر از ۳۰ درصد) است، برای بازیافت بسیار مناسب هست. در ادامه انواع روش‌های پاک‌سازی و بازیافت مواد نفتی به همراه مزایا و معایبشان مرور می‌شود.

۳-۱-روش دستی: اولین روش پاک‌سازی تانک‌های ذخیره که به هیچ‌گونه تکنولوژی خاصی نیاز نیست، روش دستی است. تجهیزات موردنیاز این روش سنتی ساده‌ترین ابزار موجود در بازار است که کارگران به آن نیاز دارند. تعدادی از این تجهیزات عبارت‌اند از: پمپ یا کامیون خلأ، وینچ، چرخ‌دستی، بیل و کلنگ، واتر جت و سایر وسایل که بتوانند لجن را از داخل تانک به بیرون و به داخل مخزن ذخیره دیگر منتقل کنند. عملیات بعدی مانند بازیافت یا پیدا کردن کاربرد برای لجن‌های خارج‌شده، جزو شرح وظایف این روش نیست[۸،۹]. شکل ۲ ورود کارگران به داخل تانک برای تمیز کردن تانک را نشان می‌دهد.

شکل ۲- ورودکارگران و تمیز کردن به روش دستی [۱۰].

روش دستی به‌ظاهر بسیار ساده و ارزان است اما در سال‌های اخیر نقدهای زیادی به این روش واردشده و از معایب آن سخن بسیار گفته‌شده است. مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۱- کارایی کم پاک‌سازی

۲- ایمنی بسیار پایین (اجرای عملیات توسط کارگران در فضای بسته خطرناک و سمی)

۳- پوشیدن لباس‌های ویژه سنگین همراه با تجهیزات ایمنی و تنفسی
۴- کار کردن کوتاه‌مدت هر کارگر در هر دوره کاری و خروج از تانک برای کاهش ریسک مسمومیت
۵- سختی کار برای کارگران برای کندن اسلج درون تانک با وسایل ابتدایی
۶- استفاده از جت واترهای پرفشار درون تانک در شرایط سخت
۷- تولید حجم زیاد لجن کنده‌شده برای انتقال به تانک ذخیره دیگر
۸- استفاده از نیروی انسانی زیاد و تجهیزات در طول زمان پاک‌سازی
۹- الزام رعایت HSE در طول زمان پاک‌سازی
۱۰- ریسک مسمومیت بالا و حتی مرگ کارگران در این شغل خطرناک
۱۱- زیاد بودن زمان تعمیرات اساسی تانک ذخیره
۱۲-از دست رفتن مواد باارزش نفتی به علت عدم بازیافت از لجن

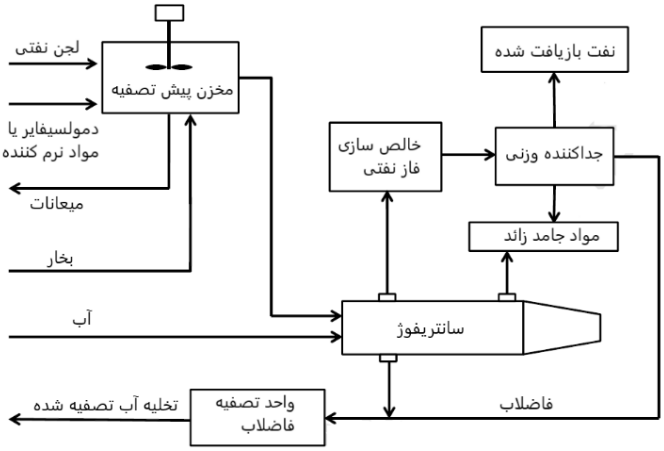
قابل‌ذکر است به علت طولانی بودن زمان عملیات پاک‌سازی، فن‌هایی داخل تانک تعبیه‌شده است که در حین کار روشن باشد تا جریان بخارات مواد شیمیایی فرار از طریق دریچه‌ها، درهای تانک و سایر منافذ و مجاری سقف به خارج منتقل شود و هوای تازه به داخل تانک وارد شود. در پایان عملیات وقتی‌که لجن‌ها به خارج تانک منتقل می‌شوند (چه به‌صورت جامد چه به‌صورت سیال قابل پمپ)، کارگران با واتر جت‌های پرفشار و محلول‌های پاک‌کننده مناسب داخل تانک را شستشوی نهایی می‌دهند [۱۰].

۱-۱-۳- روش‌های بازیافت هیدروکربن‌های نفتی از لجن‌های نفتی

همانطوریکه درروش دستی اشاره شد پایان عملیات پاک‌سازی، خروج تمام لجن از تانک اصلی به تانک ذخیره کوچک‌تر است. تصمیم بعدی برای سرنوشت لجن، بازیافت هیدروکربن‌های نفتی باارزش آن یا تبدیل لجن به فراورده دیگر، فروش لجن یا دفن لجن است. با توجه به ارزش اقتصادی لجن نفتی در دنیا بر روی روش‌های بازیافت مختلفی تحقیق و کارشده است و هریک امکانات و تجهیزان خاص می‌طلبد و مزایا و معایبی هم دارند که بعضی توجیه اقتصادی دارند و بعضی هنوز در مقیاس آزمایشگاهی توقف داشته و افزایش مقیاس نشده‌اند. مهم‌ترین این روش‌ها انتخاب‌شده و در زیر به‌اختصار توضیح داده‌شده است.

روش سانتریفوژ: در این روش از تجهیزات چرخشی خاصی با سرعت‌بالا استفاده می‌شود که با ایجاد نیروی گریز از مرکز، ترکیبات با دانسیته های مختلف از هم جدا می‌شوند (ازجمله آب، جامدات، نفت و مخلوط خمیری در لجن). از این روش برای بازیافت لجن‌های نفتی در مقیاس میدانی استفاده شده است. هرچند که در سال‌های اخیر در منابع علمی کمتر به آن اشاره می‌شود. به‌منظور بهبود کار آیی عمل سانتریفوژ و کاهش مصرف انرژی لازم است تا طی یک عملیات پیش بازیافت، مثل افزودن حلال آلی، مواد دمولسیون کننده و یا مواد شیمیایی فعال سطحی، تزریق بخار و یا حرارت مستقیم ویسکوزیته لجن کاهش یابد. شکل ۳ فرآیندی را نشان می‌دهد که با استفاده از سانتریفوژ، بازیافت لجن نفتـی را انجام می‌دهد. ابتدا لجن با ماده دمولسیون کننده یا مواد شیمیایی دیگر مخلوط می‌شود، سپس مخلوط با کمک بخار داغ در یک مخزن پیش بازیافت مخلوط شده تا ویسکوزیته آن کاهش یابد. لجنی که ویسکوزیته آن کاهش‌یافته با یک نسبت معین لجن/ آب، با آب در سرعتـــی بالا سانتریفوژ می‌شود. بعد از سانتریفوژ، آبی که جداشده برای تصفیه فرستاده می‌شود و نفت جداشده (که هنوز حاوی آب و جامدات است) به جداکننده وزنی فرستاده

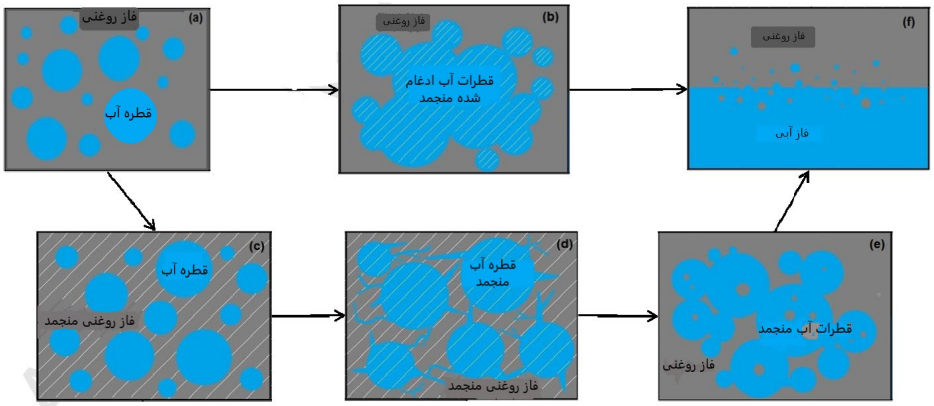
می‌شود تا جداسازی کامل صورت بگیرد. رسوبات حاصل از سانتریفوژ و جداکننده به‌عنوان باقیمانده‌های جامد جمع‌آوری می‌شوند تا بیشتر پاک‌سازی شوند.



شکل ۳- نمای شماتیک روش سانتریفوژ مورداستفاده در بازیافت لجن‌های نفتی [۱۱]

به‌طورکلی سانتریفوژ یک تکنولوژی نسبتا تمیز برای بازیافت لجن است. مزیت دیگرش این است که تجهیزات آن اغلب جای زیادی اشغال نمی‌کنند. ولی این فرآیند مصرف انرژی بالایی دارد تا نیروی سانتریفوژ کافی برای جدا کردن نفت از لجن تولید کند. به خاطر تجهیزات گران و محدودیت‌های آن استفاده از سانتریفوژ به مقیاس‌های کوچک محدود می‌شود. بعلاوه این دستگاه‌ها سروصدای زیادی ایجاد می‌کنند [۱۱].

روش انجماد/ ذوب (Freeze /Thaw): این روش یک پروسه دیگر جهت بازیافت نفت از لجن نفتی از طریق جدا کردن فاز آب از فاز نفت (امولسیون W/O) بوده و دمولسیفیکاسیون نام دارد. دو مکانیسم مختلف باعث دمولسیون شدن می‌شوند که در شکل ۴ (b,c) نشان داده‌شده است. مکانیسم اول (b) زمانی رخ می‌دهد که فاز آب در امولسیون بر بالای فاز نفتی یخ بزند. انبساط حجمی قطرات آب یخزده باعث می‌شود که آن‌ها به هم‌آمیخته و یک بی‌نظمی داخلی در امولسیون به وجود آید و با افت دما به‌تدریج فاز نفتی هم یخ بزند. در حین فرآیند ذوب شدن یخ، فاز نفتی در اثر کشش سطحی به هم‌آمیخته و مخلوط آب و نفت می‌تواند لایه‌لایه شده و در اثر نیروی وزنی به دو فاز توده‌ای تبدیل شود (f).



شکل ۴-نمای شماتیک دمولسیون شدن امولسیون W/O به روش فریز کردن / ذوب شدن [۱۱]

مکانیسم دوم (c) زمانی رخ می‌دهد که فاز نفتی در بالای فاز آب یخ بزند. این کار یک قفس جامد تشکیل می‌دهد که قطرات آب را در حین فرآیند یخ زدن به دام انداخته و کپسول‌هایی تشکیل می‌دهند. با افت دما این قطرات به‌تدریج یخ می‌زنند و انبساط حجمی قطرات یخ‌زده قفس‌ها را می‌شکنند. این کار می‌تواند شکاف‌های ریزی را ایجاد کند که اجازه می‌دهد قطرات آب یخ نزده نشت کنند و با یکدیگر تماس برقرار کنند و شبکه بزرگ میکرو کانالی تشکیل دهند (d). در حین پروسه آب شدن یخ این شبکه با قطرات آب به‌هم‌پیوسته نفوذ می‌کند و باعث وارونگی فاز می‌شود (e). سپس چنین مخلوط آب و نفت ناپایداری، می‌تواند لایه‌لایه شده و در اثر نیروی وزنی به دو فاز توده‌ای تبدیل شود (f).

به‌طورکلی دمولسیفیکاسیون به روش freeze/thaw تحت تأثیر مقدار آب، شوری (نمک) فاز آبی، وجود سورفکتانتها و مقدار جامدات در امولسیون، دمای یخ زدن و ذوب شدن و طول مدت بازیافت قراردارد. کاربرد صنعتی این روش نیازمند زمان یخ زدن زیاد و در نتیجه هزینه‌های بالا است (حداقل ۸ ساعت زمان برای یخ زدن در دمای ۲۰°c-). بنابراین کاربرد این روش می‌تواند در مناطقی استفاده شود که سردسیر هستند و یخ زدن به‌طور طبیعی در آنجا امکان‌پذیر است [۱۱].

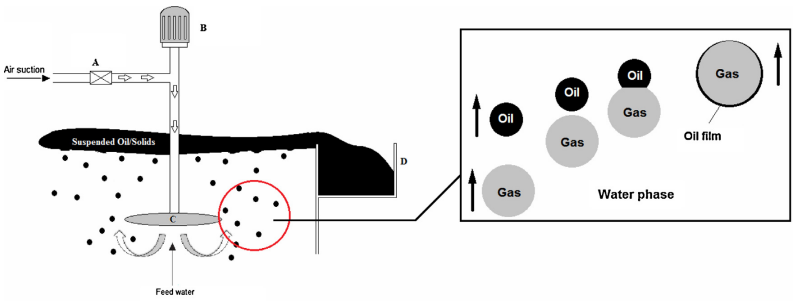
روش پیرولیز لجن: پیرولیز، تجزیه حرارتی مواد آلی در دمای بالا۵۰۰ تا۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک جو خنثی است. در فرآیند پیرولیز، بسته به شرایط، گازهای غیر متراکم، هیدروکربن‌هایی با وزن مولکولی پایین در حالت متراکم (مایع) و محصول جامدی بنام زغال تولید می‌گردد. برای مثال محصول اصلی بازیافت به روش پیرولیز سریع (یعنی پیرولیزی که مواد خام را سریعا در یک دمای کنترل‌شده حرارت می‌دهد و بعد خیلی سریع محصولات فرار تشکیل‌شده در رآکتور را سرد می‌کند) می‌تواند مایع باشد، که می‌تواند به‌عنوان سوخت و غیره بکار رود. لیو و همکارانش دریافتند که حدود ۸۰ درصد از کل ترکیبات آلی موجود در لجن نفتی می‌تواند با فرآیند پیرولیز به هیدروکربن‌های قابل‌استفاده تبدیل شود. آن‌ها دمای پیرولیز را در حدود ۳۲۷ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و راندمان را خوب گزارش کردند [۱۲]. چنگ و همکارانش پروسه پیرولیز را در دمای ۴۴۰°c انجام دادند و درنهایت ویژگی‌های محصولات تقطیرشده خیلی به روغن دیزل نزدیک بود [۱۳]. کارائیل دریم و همکارانش نشان دادند که تجزیه اصلی لجن در دمای ۱۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد در حالیکه تجزیه مواد معدنی در دمای بالاتر از ۴۰۰ °c شروع می‌شود [۱۴] .پیرولیز مزایایی دارد ازجمله اینکه محصولات مایعی ایجاد می‌کند که می‌توانند به‌راحتی ذخیره شوند و یا حمل‌ونقل گردند. به‌علاوه نفت بازیابی شده با محصولات تقطیری نفتی حاصل از پالایشگاه‌ها قابل قیاس بوده و می‌تواند مستقیما به‌عنوان سوخت مورداستفاده قرار بگیرد. در مقابل این مزایا، بکار گرفتن این روش در مقیاس بزرگ ازلحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست، چراکه هم محصولات ارزش اقتصادی‌شان خیلی بالا نیست و هم تجهیزات این فرآیند نسبتا پیچیده است؛ اما عمده هزینه، به خاطر صرف انرژی بالا برای انجام واکنش گرماگیر است. بعلاوه لجن‌های نفتی معمولا حاوی مقدار نسبتا زیادی آب هستند و آب‌زدایی (گرفتن آب) از لجن قبل از پیرولیز خود هزینه فرآیند را بالا می‌برد [۱۱].

روش تابش مایکروویو: انرژی مایکروویو می‌تواند از طریق برهم‌کنش مولکولی با میدان الکترومغناطیسی، مستقیما در مواد نفوذ کند و یک فرآیند حرارتی سریع را فراهم آورد. افزایش سریع دما می‌تواند هیدروکربن‌های سنگین را بشکند و به هیدروکربن‌های سبک‌تر تبدیل کند. چنین اثر حرارتی می‌تواند برای دمولسیفیکاسیون امولسیون W/O نیز بکار

گرفته شود و باعث کاهش ویسکوزیته شده و درنتیجه می‌تواند نشست قطرات آب در امولسیون را سرعت بخشد. در صنعت معمولا از فرکانس ۹۰۰ تا ۲۴۵۰ مگاهرتز استفاده می‌شود. فنگ و لای تابش مایکروویو را برای آزمایش میدانی، جهت دمولسیون کردن ۱۸۸ بشکه امولسیون W/O در مخزن بکار بردند. نتایج نشان داد که امولسیون به ۱۴۶ بشکه نفت و ۴۲ بشکه آب تفکیک می‌شود. در این آزمایش جداسازی آب از امولسیون بیشتر از زمانی بود که حرارت دهی های مرسوم و متداول انجام می‌شد[۱۵].

اثر و کارآیی تابش مایکروویو بر روی دمولسیفیکاسیون لجن نفتی ممکن است تحت تأثیر چند فاکتور قرار بگیرد، ازجمله: قدرت مایکروویو، طول مدت تابش مایکروویو، سورفکتانت، pH، نمک و خصوصیات لجن مثلا نسبت آب-نفت. به‌طورکلی در مقایسه با روش‌های حرارتی دیگر تابش مایکروویو می‌تواند، انرژی مولکول‌ها در محیط را به‌سرعت بالا ببرد و منجر به افزایش سرعت واکنش و حرارت دهی فوق بالا در عرض چند دقیقه شود. زمان حرارت دهی کوتاه، تابش مایکروویو را تبدیل به روشی می‌سازد که کنترل آن آسان است و درعین‌حال انرژی بالا و مؤثری دارد. ولی کاربرد این روش در مقیاس صنعتی به‌منظور پاک‌سازی لجن‌های نفتی به تجهیزات خاصی نیاز دارد که ازنقطه‌نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست [۱۱].

روش فلوتاسیون کفی: فلوتاسیون کفی یک عملیات واحد است که بر پایه شیمی سطح می باشد و برای جدا کردن ذرات ریز از یک سوسپانسیون آبی بکار می‌رود، که شامل گرفتن و گیر انداختن قطرات نفت یا جامدات خیلی ریز به‌وسیله حباب‌های هوا در یک دوغاب آبکی، شناور شدن آن‌ها و در ادامه جمع‌آوری آن‌ها از لایه کف می باشد. فلوتاسیون کفی به‌طور موفقیت‌آمیزی برای تصفیه فاضلاب‌های نفتی پالایشگاه‌ها بکار گرفته‌شده است و استفاده از آن برای پاک‌سازی لجن نفتی در حوضچه‌های ذخیره نیز اخیرا موردتوجه قرارگرفته است [۱۱]. شکل ۵ یک نمای شماتیک از این فرآیند را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمای شماتیک فلوتاسیون کفی در فرایند جداسازی نفت/آب [۱۱]

لجن ابتدا با مقدار معینی آب مخلوط می‌شود تا یک دوغاب از لجن تشکیل شود. سپس با تزریق هوا، حباب‌های ریزی ایجاد می‌شود که به قطرات نفت در مخلوط دوغابی نزدیک شده و لایه فیلم آب مابین نفت و حباب هوا می‌تواند نازک شود تا به یک ضخامت بحرانی برسد و موجب پاره شدن فیلم آب و پخش شدن نفت در حباب‌های هوا شود. درنهایت گلوله‌های قطرات نفت با حباب‌های هوا می‌توانند به‌سرعت به بالای مخلوط آب/نفت بیایند و نفت جمع شده در سطح جمع‌آوری شود (مانند خامه‌گیری یا کف گیری) و برای تصفیه بیشتر فرستاده شود.

راماسوانی و همکارانش از این تکنیک استفاده کردند و مشاهده کردند که بازیافت نفت تحت شرایط بهینه فلوتاسیون تا ۵۵ درصد می‌رسد. افزودن مواد فعال سطحی و حلال می‌تواند بازیابی نفت و کارایی این روش را افزایش دهد [۱۶].

به‌طورکلی انجام این روش تحت تأثیر چند فاکتور ویسکوزیته، مقدار جامدات و دانسیته، pH، میزان نمک، دما، سایز حباب‌های هوا، وجود مواد فعال سطحی و مدت‌زمان فلوتاسیون قرار می‌گیرد. فلوتاسیون کفی یک روش ساده و نسبتا ارزان‌قیمت برای پاک‌سازی لجن است ولی معمولا وقتی مؤثراست که لجن ویسکوزیته پایینی داشته باشد، بعلاوه نفت جمع‌آوری‌شده (یا کف گیری شده) از سطح مخلوط، بازهم نیاز به تصفیه بیشتر دارد. نفت بازیافت شده حاوی مقدار نسبتا زیادی آب است. به دلیل این محدودیت‌ها هنوز به‌کارگیری این روش در مقیاس میدانی چندان قابل انجام نیست [۱۱].

سایر روش‌های بازیافت و دفن لجن نفتی: تحقیقات آزمایشگاهی زیادی با روش‌های دیگر مثل روش الکتروسینتیکی [۱۷] و روش اولتراسونیک [۱۸] برای بازیافت یا تولید انرژی از لجن‌های نفتی انجام‌شده است.هریک از این روش‌ها نیازمند تجهیزات ویژه بوده و به‌نوبه خود دارای مزایا و معایبی هستند. درمجموع در حال حاضر این روش‌ها در مقایسه با سایر روش‌های بازیافت توضیح داده‌شده ازلحاظ صنعتی مقرون‌به‌صرفه نیستند [۱۱].

۲-۳-روش ترموشیمیایی: در سال ۱۹۹۶ محققان شرکتی به نام پتروبراس برای اولین بار به‌صورت صنعتی از فرایند ترموشیمیایی برای لجن زدایی تانک ذخیره نفت خام استفاده کردند [۱۹] بر اساس این روش خواص فیزیکی و شیمیایی لجن مشخص می‌گردد و بعد سینتیک واکنش ترموشمیایی محاسبه می‌شود. پروسه بر اساس یک واکنش گرمازای قوی می باشد که بین دو نمک نیتروژن صورت می‌گیرد. در زیر مثالی از این نوع واکنش‌ها آمده است.

$$2\ NaNO_2 + (NH_4)_2SO_4 \rightarrow 2\ N_2 + Na_2SO_4 + 4\ H_2O$$

در این پروسه حجم بسیار زیاد نیتروژن تولیدی باعث ایجاد تلاطم می‌گردد. گرمای آزادشده در این واکنش لجن را ذوب کرده و به‌صورت برگشت‌ناپذیر سیال می‌شود. بعد از جمع‌آوری و انتقال به واحد نمک‌زدایی می‌تواند در جریان پالایش مجدد و بازیافت قرار گیرد.این واکنش که همراه با حلال آلی مناسب است باعث حل شدن برگشت‌ناپذیر رسوبات نفتی می‌شود طوریکه حلال آلی، نفت و ترکیبات نفتی موجود در لجن را پراکنده کرده و از برگشت دوباره آن به فاز جامد در اثر سرد شدن جلوگیری می‌کند. همچنین می‌توان یک پراکنند شیمیایی نیز اضافه نمود تا پروسه بهتر پیش برود.

ترتیب مراحل انجام عملیات به‌صورت زیر می باشد:

الف – واردکردن محلول آبی نمک نیتروژن به درون مخزن

ب – اضافه کردن حلال آلی (نفت) به‌اضافه دیسپرس کننده به درون مخزن

ج – اضافه کردن کاتالیزور به مخزن تا با واکنشگرها مخلوط شود. (کاتالیزور pH محلول آبی را از کمی قلیایی به کمی اسیدی تغییر می‌دهد و واکنش ترموشیمیایی شروع می‌شود.)

د- پس از گذشت ۲ تا ۳ ساعت، واکنش ترمو شیمیایی تمام می‌شود و جداسازی فازها در مخزن صورت می‌گیرد، به‌این‌ترتیب که:

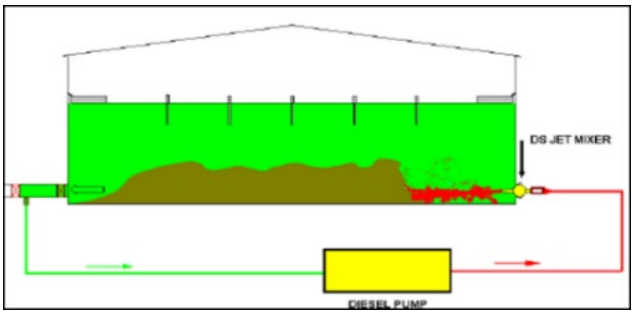
- ✓ یک‌فاز نفتی در بالا (مخلوط حلال و ترکیبات آلی لجن)
- ✓ یک‌فاز آبی در وسط (محلول سدیم سولفات و آب اصلی خود لجن)
- ✓ فاز جامدات در کف مخزن (جامدات معدنی موجود در لجن که آزادشده‌اند)

این عملیات از ایمنی خوبی برخوردار است چون در حین انجام این روش فقط یک گاز خنثی و اشباع نیتروژن (گاز اتمسفر)، در مخزن تولید می‌شود. در آخر واکنش محلول سولفات سدیم به‌طور کامل در مخزن جداسازی می‌شود [۲۰] البته روش ترموشیمیایی نیز مانند سایر روش‌های پاک‌سازی لجن محدودیت‌هایی در کاربرد دارد. این روش بیشتر زمانی مؤثراست که لجن ماهیت وکس بیشتری داشته و درصد آب کمی هم داشته باشد.

۳-۳-روش بیولوژیکی: یکی دیگر از روش‌های پاک‌سازی لجن‌ها و رسوبات ته‌نشین شده در مخزن‌های ذخیره نفت، استفاده از میکروارگانیسم‌ها مثل قارچ‌ها، باکتری‌ها و مخمرها می باشد که همگی از خاک‌های آلوده نفتی جدا می‌شوند. این میکروارگانیسم‌ها مواد آلی بنام مواد فعال سطحی طبیعی تولید می‌کنند. مهم‌ترین ویژگی مواد فعال سطحی طبیعی نسبت به مواد فعال سطحی شیمیایی سمیت پایین، زیست‌تخریب‌پذیری، فعالیت سطحی بالا، عملکرد بهتر در شرایط سخت (PH بالا، محیط‌های نمکی و دماهای بالا)، غلظت بحرانی میسل پایین (CMC)، در دسترس بودن مواد اولیه جهت تولید و کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی است [۲۱]. امروزه تولید و مصرف این مواد بیولوژیک یعنی مواد فعال سطحی طبیعی به دلیل سازگاری زیستی علاوه بر صنعت نفت به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در صنایع دیگر مانند کشاورزی، آرایشی و بهداشتی، غذا، داروسازی نیز کاربرد پیداکرده و در حال گسترش است.

در عملیات پاک‌سازی تانک‌های ذخیره، مواد فعال سطحی طبیعی با کاهش کشش سطحی و تشکیل امولسیون پایدار W/O، ویسکوزیته لجن کاهش‌یافته و آن را به سیال قابل پمپ تبدیل می‌کند که این فرایند مکش لجن را تسهیل می‌کند. در فرایند صنعتی لجن زدایی مخلوطی از بیوسورفکتانت، آب و نفت خام به داخل مخزن تزریق می‌شود و آن‌قدر در داخل تانک به گردش در می‌آید تا تمام لجن‌ها امولسیون تشکیل دهند. این روش علیرغم اینکه مورد توجه قرارگرفته اما نقد فراوانی نیز به آن وارد است. در مجموع به علت طولانی بودن پروسه کشت و تکثیر میکروارگانیسم ها و تولید مواد فعال سطحی طبیعی از لجن نفتی و طولانی شدن عملیات کامل پاک‌سازی، تانک باید زمان زیادی را در حالت تعمیرات اساسی قرار داشته باشد این اصلا برای صاحبان تانک خوشایند نیست و صرفه اقتصادی مطلوبی ندارد.

۴-۳-روش جت واش: اخیرا پیشرفت‌های زیادی در زمینه کاربرد روش جت واش با سرعت بالا به منظور پاک‌سازی لجن‌های نفتی صورت گرفته است. این جت‌ها درون مخزن ذخیره وارد می‌شوند تا عمل سوسپانسیون کردن مجدد لجن‌های انباشته را انجام دهند و پارافین موجود در لجن را برش دهند. اساس این روش استفاده از حرارت همراه با بخارآب می‌باشد. در این روش ابتدا با استفاده از پمپ‌های فشار بالا و آبفشان‌های مخصوص (جت واش های)، هم زدن سریع لجن و انحلال ترکیبات واکسی آن صورت گرفته، سپس مواد حل‌شده از پالایه‌های دومرحله‌ای عبور داده می‌شوند. پس‌ازآن مواد جامد باقیمانده، شامل گل‌ولای، از پالایه‌ها جدا و دفع شده و مواد نفتی نیز به چرخه تصفیه نفت خام بازمی‌گردند. در شکل ۶ استفاده از جت واش در پاک‌سازی مخازن ذخیره نفت خام نمایش داده‌شده است.

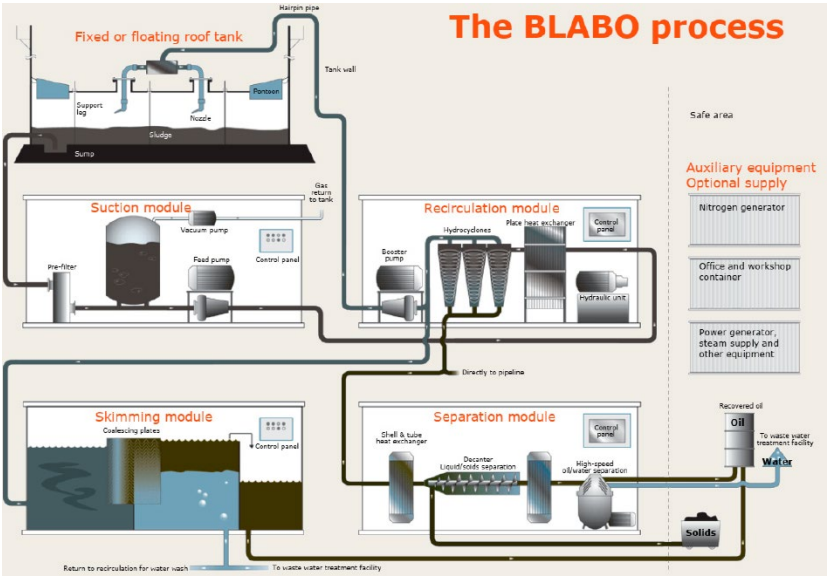


شکل ۶- استفاده از جت واش در پاک‌سازی مخازن نفتی

این روش نیز مثل سایر روش‌ها معایبی به همراه دارد ازجمله اینکه بعضی لجن‌ها مستعد مایع شدن به‌وسیله حرارت نمی‌باشند. همچنین وقتی لجن نفتی مایع شد باید قبل از سرد شدن پمپ شود چون سرد شدن باعث تشکیل مجدد لجن جامد یا نیمه جامد می‌شود. سرد شدن در خطوط لوله پمپ منجر به گرفتگی می‌شود که رفع آن بسیار مشکل است. بعلاوه لجنی که از این روش از مخزن ذخیره خارج می‌شود اغلب باید دوباره حرارت داده شود تا بتوان آن‌ها از محل نگهداری جدیدش نیز دوباره پاک نمود. حرارت دادن لجن گازهایی را آزاد می‌کند که ممکن است خطر آتش‌سوزی و یا خطرات سلامتی برای انسان به همراه داشته باشد.

۵-۳-روش اتوماتیک: در سال‌های اخیر به علت تأثیرات منفی روش پاک‌سازی دستی، قوانین سخت گیرانه تر در صنعت نفت برای ایمنی کارگرانی که مدت زیادی با مواد خطرناک و سمی سروکاردارند و همچنین حفاظت بیشتر محیط‌زیست وضع کرده‌اند. به همین علت برای پاک‌سازی تانک‌های ذخیره نیاز به روش ایمن‌تر و کم‌خطرتر می باشد و این آغاز تولد روش‌های اتوماتیک بود. روش‌های اتوماتیک با پیشرفت‌های روزبه‌روز کامل‌تر شده و ورودی کارگران به داخل تانک به حداقل ممکن تا صفر رسیده است [۲۲]. کلیات روش پاک‌سازی اتوماتیک لجن‌های نفتی شامل حل کردن لجن در حلال‌های نفتی و شیمیایی، مکش لجن نرم شده، جداسازی مواد از یکدیگر- بازیافت، تصفیه آب و دفن پسماندهای جامد بی‌خطر می باشد.

شکل ۷ یک نمای کلی از فرایند پاک‌سازی اتوماتیک است که در شرکت اورکو با چرخه کامل طراحی‌شده و بازیافت نفت از لجن صورت می‌گیرد. در دنیا شرکت‌های مختلفی وجود دارند که با ایجاد تغییرات در طراحی بخش‌های مختلف این فرایند و یا با حذف و اختیاری کردن آن‌ها، سعی در کاهش هزینه عملیات با حفظ اهداف موردنظر کرده‌اند. [۲۳].



شکل ۷- فرایند پاک‌سازی اتوماتیک شرکت اورکو [۲۴]

بخش‌های مهم این روش مطابق شکل عبارت‌اند از:

۱- حداقل رساندن اکسیژن: اکسیژن اتمسفر داخل تانک با گاز ازت برای جلوگیری از خطر انفجار و آتش‌سوزی تا به ۸ درصد رسانده می‌شود.

۲- بخش مکش (suction): با کمک پمپ‌های خلأ و پمپ‌های سانتریفیوژ لجن‌های نفتی از داخل تانک کشیده و سپس به بخش گردش مجدد فرستاده می‌شود. در این بخش عموما از پالایه‌هایی جهت جلوگیری از انسداد جریان توسط ضایعات جامد و آلودگی‌های متفرقه قبل از پمپ خلأ استفاده می‌شود.

۳- بخش گردش مجدد (recirculation): در این بخش حل کردن تدریجی و کامل لجن‌های داخل تانک با چرخش حلال‌های نفتی از طریق تزریق حلال به داخل تانک صورت می‌گیرد. در هر چرخه لجن پاک‌سازی‌شده به درون سایکلونها وارد و جداسازی حلال از لجن انجام می‌شود. حلال بازیابی شده مجددا به داخل تانک پمپ می‌شود و لجن جداشده برای تفکیک به بخش جداسازی فرستاده می‌شود. این چرخه آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا تمام لجن‌های داخل تانک به‌طور کامل حل‌شده و از تانک خارج شوند.

۴- بخش جداکننده (separation): بعد از جداسازی اولیه حلال از لجن در بخش گردش مجدد، جداسازی نهایی ۳ بخش لجن یعنی هیدروکربن‌های نفتی، آب و مواد جامد با دکانتور و جداکننده انجام می‌شود. مواد جامد جداشده از دکانتور با محلولهای پاک‌کننده مناسب شستشو داده می‌شود و با مجوز محیط‌زیست برای دفن به مکانه‌ای مشخص ارسال می‌شوند. بخش نفت و آب به‌وسیله جداکننده‌ها جدا می‌شوند. نفت با تانکر به پالایشگاه یا جهت فروش حمل می‌شود آب نیز برای شستشوی نهایی استفاده می‌شود. درنهایت آب پس از تصفیه و با مجوز محیط‌زیست به مصارف موردنظر مثل آبیاری درختان و فضای سبز بکار می‌رود.

قابل‌ذکر است که در بخش‌های گردش مجدد و جداسازی برای سهولت فرایندها حتما از سیستم گرمایشی استفاده می‌شود.

۵- شستشوی نهایی (skiming): درنهایت عملیات پاک‌سازی در صورت وجود باقیمانده‌های لجن چسبیده به کف، سقف، دیوار و پایه‌های نگهدارند سقف و ... و یا شن و ماسه با واتر جت‌های تحت‌فشار و محلولهای پاک‌کننده پایان می‌پذیرد.

به‌عنوان‌مثال ۳ نمونه کار عملیات پاک‌سازی شرکت اورکو در سایت‌های مختلف جهت مقایسه و توصیف بیشتر روش در جدول شماره ۳ ارائه‌شده است. [۲۵].

جدول ۳ – موردهای عملیاتی شرکت ORECO's BLABO در پاک‌سازی تانک‌های ذخیره نفت خام [۲۵]

مطالعه موردی	اندازه تانک(m^3)	متوسط ارتفاع لجن(m)	کل حجم لجن(m^3)	کل زمان پاکسازی(روز)	میزان بازیابی٪
پالایشگاه فاولی انگلستان	۱۸۳۰۰	۱/۴۵	۱۸۳۲	۱۵	۹۷/۸
پایانه ویبا لیبی	۸۰۴۰۰	۴/۵	۲۲۶۰۰	۱۲۱	۹۸
پایانه زویی تینا لیبی	۷۹۰۰۰	۰/۸۵	۵۳۰۰	۳۲	۹۴

از شاخصه‌های این جدول کوتاهی زمان عملیات پاک‌سازی با توجه به حجم بالای انباشت لجن داخل تانک و میزان درصد بازیافت فراورده‌های نفتی از لجن می باشد.

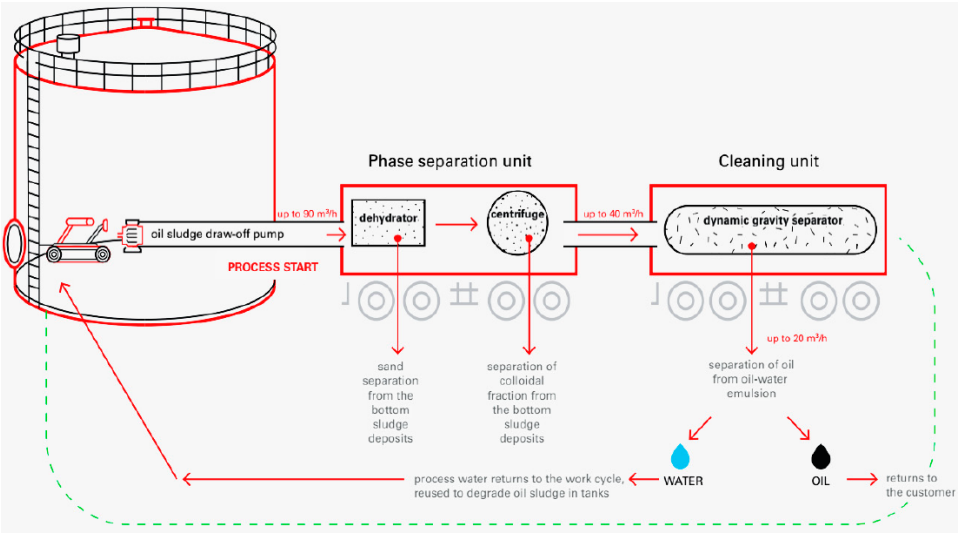
همانطوریکه قبلا نیز اشاره شد عملیات کامل اتوماتیک را می‌توان با کاهش یا حذف بخش‌هایی ساده‌تر کرد. در بعضی شرکت‌ها بخش‌های گردش مجدد، جداکننده و شستشوی نهایی در ۱ یا ۲ بخش تجمیع و طراحی‌شده‌اند. تفاوت سلیقه این شرکت‌ها در کاهش هزینه تجهیزات است اما نتیجه آن ممکن است سبب افزایش تعداد کارگران، کاهش کارایی و کاهش یا عدم بازیافت مواد نفتی از لجن باشد.

۶-۳-روش رباتیک: روش رباتیک تکنولوژی جدیدتری است اما هنوز نتوانسته است با وجود کارایی و مزایای زیادش اعتماد صاحبان تانک را جلب کند اما فضا برای پیشرفتش زیاد است. مزیت اصلی این روش عدم استفاده از کارگران در داخل فضای بسیار سمی و خطرناک تانک است .کنترل دستگاه رباتیک مجهز به دوربین با ریموت و خارج از تانک صورت می‌گیرد. در حقیقت روش رباتیک بسیار شبیه روش دستی است با این تفاوت که بجای کارگر ربات وارد تانک می‌شود و در حین عملیات تصاویر زنده به بیرون تانک ارسال می‌کند و تمام مسائل پاک‌سازی و ایمنی توسط اتاق کنترل هدایت و نظارت می‌شوند. دستگاه ربات طبق برنامه با اجرای عملیات تعیین‌شده لجن را به‌صورت لایه‌ای نرم و مایع کرده و با مکش یا سیستم مکانیکی به بیرون تانک منتقل می‌شود. به‌غیراز ربات تعدادی از تجهیزات و ابزارهای اساسی دیگر این روش عبارت‌اند از: سیلندر، موتور هیدرولیکی، شیر برقی متناسب، آشکارساز گاز قابل‌احتراق از نوع ضد انفجار، جعبه اتصال ضد انفجار، شیر برقی کنترل جریان، لامپ مادون‌قرمز ضد انفجار، دوربین ضد احتراق، جاروب کن، واتر جت، دوربین بزرگنمایی خوب و ... . لیست تجهیزات با توجه به پیچیدگی پروسه طراحی‌شده متفاوت اما درکلی‌ات مشابه موارد نامبرده شده هستند [۱۱].

مزیت دیگر این روش این است که نیازی به خارج‌سازی اکسیژن از اتمسفر داخلی تانک نبوده و بدین ترتیب هزینه این بخش حذف می‌گردد. در عوض کلیه نکات ایمنی مثل ضد انفجار بودن دستگاه و کنترل هیدرولیکی دستگاه رباتیک کاملا منظور و رعایت شده است. بازیافت مواد نفتی از لجن پاک‌سازی‌شده موضوع دیگری است که ممکن

است مانند روش دستی به شرکت دیگر واگذار شود و یا شرکت در ادامه عملیات پاک‌سازی تجهیزات بازیافت را نیز در سرویس خود بگنجاند و صفرتا ۱۰۰ پاک‌سازی تانک ذخیره و بازیافت را خود به عهده بگیرد.

به‌عنوان نمونه شرکت MARTin Oil tech یک از شرکت‌های بزرگ پاک‌سازی لجن‌های نفتی است که توانسته با تقویت و بهبود دستگاه رباتیک روبنده، نظارت ویدیویی دقیق با سیستم روشنایی داخل تانک، دستگاه تخلیه، مواد شوینده داشته و همین‌طور سیستم بازیافت مواد نفتی از لجن، میزان جابجایی لجن را از ۱۰ m^3/h به ۹۰ m^3/h افزایش داده و لجن با دانسیته متوسط ۱۰۰kg/m^3 را به اسرعت ۴۰ تن در ساعت گردش مجدد کند [۲۶]. کلیات واحد جداسازی و پاک‌سازی شبیه به روش اتوماتیک است. برای درک بهترین روش شکل ۸ ارائه‌شده است.



شکل ۸- پاک‌سازی تانک ذخیره با روش رباتیک شرکت MARTin Oil tech [۲۷].

۴- بحث و بررسی

در بین شش روش پاک‌سازی توضیح داده‌شده با توجه به شرایط سرمایه‌گذاری و امکانات کشورهای مختلف و صرفه اقتصادی، روش‌های دستی، اتوماتیک و رباتیک از استقبال بیشتری برخوردار بوده‌اند که در ادامه کارایی، ایمنی، اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های این سه روش مورد بحث و بررسی و مقایسه بیشتر و بهتر قرار می‌گیرند.

۴-۱-کارایی روش‌ها

یکی از مهم‌ترین فاکتورهای انتخاب روش پاک‌سازی لجن‌ها کارایی روش می‌باشد. کارایی روش‌های پاک‌سازی بر اساس محاسبه میزان حجم لجن پاک‌سازی‌شده به ساعت یا روز تعریف‌شده است. برای به دست آوردن این فاکتور کل حجم لجن انباشته‌شده در تانک به طول دوره پاک‌سازی تقسیم می‌شود. حجم لجن داخل تانک از طریق ابعاد تانک ذخیره یعنی قطر تانک و ارتفاع لجن داخل تانک تخمین زده می‌شود. مدت‌زمان عملیات پاک‌سازی با توجه به شرح فرایند محاسبه می‌شود. به‌طورکلی زمان عملیات از آغاز تا پایان پاک‌سازی عبارت‌اند از:

۱- نقل‌وانتقال تجهیزات به محل موردنظر با کامیون، تریلی و ...

۲- بارگذاری تجهیزات روی زمین (جدا بودن تجهیزات یا سرهم بودن تجهیزات در کانتینر)

۳- نصب تجهیزات و پایپینگ و ...

۴- خارج‌سازی اکسیژن از اتمسفر داخلی تانک با گاز ازت

۵- شروع عملیات اصلی یعنی گردش مجدد، جداسازی، شستشوی نهایی و ...

۶- جمع‌کردن تجهیزات و ترک محل

در بعضی تجزیه وتحلیل‌ها برای محاسبه کارایی روش‌ها ممکن است فقط به زمان کل ارجاع داده شود (چون حجم لجن تانک برای تمام روش‌ها ثابت است) در نتیجه به‌جای مقیاس حجم بر ساعت یا روز ممکن است فقط به مدت‌زمان پاک‌سازی یعنی تعداد روزها یا ماه‌ها بسنده شود. به نظر می‌رسد که استفاده از مقیاس حجم بر ساعت یا روز صحیح‌تر و آسان‌تر باشد.

روش دستی: درروش دستی زمان عملیات در مقایسه با دو روش دیگر طولانی‌تر است و بخشی از این طولانی شدن زمان به بارگذاری و نصب تجهیزات برمی‌گردد. در این روش تجهیزات پاک‌سازی و ابزارهای جانبی متنوع و زیادی وجود دارد که سرهم‌بندی نشده اند و برای نصب آن‌ها هم‌زمان زیاد و هم نیروی کارگر بیشتری نیاز است. نکته بعدی در محاسبه زمان این روش، اهمیت خارج‌سازی اکسیژن از اتمسفر داخل تانک است چون در حین عملیات ممکن است مواد فرار تولید شوند و در صورت انباشت زیاد این گازها و وجود اکسیژن باعث انفجار و آتش‌سوزی گردد. پس در حین عملیات باید مرتب خارج‌سازی اکسیژن انجام شود و این کار باعث کندی عملیات و طولانی شدن زمان پاک‌سازی خواهد شد. نکته آخری که در طولانی شدن فرایند دستی لحاظ می‌شود استفاده از حلال داغ جهت نرم کردن لجن تا رسیدن به نقطه‌ای است که قابلیت پمپ کردن داشته باشد. با توجه به ساده بودن تجهیزات نسبت به دو روش دیگر این بخش بسیار زمان‌بر می‌شود.

شرکت Mirrico تحقیق جالبی از مقایسه میزان کارایی پاک‌سازی روش سنتی با روش رباتیک انجام داده است [۲۹]. نتایج به این صورت گزارش‌شده است که زمان عملیات روش سنتی ۳ برابر روش رباتیک است و اگر حداقل کارایی روش رباتیک ۱۰ مترمکعب بر ساعت باشد متوسط کارایی روش دستی ۳/۵ مترمکعب بر ساعت است.

روش اتوماتیک: کارایی روش اتوماتیک توسط شرکت اورکو که یکی از بزرگ‌ترین و کامل‌ترین شرکت‌های خدمات دهنده پاک‌سازی لجن‌های نفتی دنیاست بررسی‌شده است. کارایی گزارش‌شده این شرکت $۶/۶m^3/h$ یا $۱۶۰\ m^3/d$ می‌باشد. زمان در نظر گرفته‌شده ۱ تا ۶ روز با مزیت بزرگ بازیافت هم‌زمان حدود ۹۵ درصدی ترکیبات نفت از لجن که در دو روش دیگر سنتی و رباتیک وجود ندارد. البته درروش رباتیک در بعضی شرکت‌ها مجهز به دستگاه‌ها و تجهیزات بازیافت می‌باشند. همانطوریکه در بخش ۳-۵ گفته شد شرکت‌های بزرگ تمام بخش‌های گردش مجدد، جداسازی، بازیافت و شستشوی نهایی تانک را دارند اما شرکت‌های کوچک‌تری هم وجود دارند که جهت کاهش هزینه تجهیزات و آسانی روش با ایجاد تغییراتی در فرایند با تجمیع یا حذف یک یا دو بخش باعث افزایش یا کاهش زمان پاک‌سازی‌شده و به‌تبع آن تأثیر بسزایی در کارایی خواهند گذاشت. به‌عنوان‌مثال شرکت ZAOPIN در سه مورد عملیات پاک‌سازی تانک‌های ذخیره نفت خام با ظرفیت‌های مختلف، میزان کارایی آن‌ها از ۸ تا ۱۰/۳ مترمکعب در ساعت یا متوسط ۹/۲۵ مترمکعب در ساعت گزارش کرده است [۱۰].

روش رباتیک: روش رباتیک نسبت به سایر روش‌ها تصنعی‌تر و دارای مزایای بیشتری است ازجمله حمل‌ونقل آسان‌تر ، بارگذاری روی هر نوع زمین ، کار کردن در هر دمایی از ۳۰- تا ۴۵+ درجه سانتی‌گراد ، عدم نیاز به تخلیه اکسیژن از هوای اتمسفر داخل تانک ، کار کردن در حجم اشغال‌شده بالای تانک حتی بالاتر از دریچه وعاری بودن از بسیاری ظرافت‌های روش‌های دیگر. شرکت MIRRICOS MARKET تحقیقات موردی در تانک‌های با ظرفیت‌های مختلف

انجام داده است و کارایی عملیات از ۵/۳ تا ۸ مترمکعب بر ساعت و متوسط ۶/۳ مترمکعب بر ساعت گزارش کرده است [۱۰].

۲-۴- ایمنی روش‌ها

روش دستی: روش دستی در بین روش‌های صنعتی پاک‌سازی تانک‌های ذخیره بیشترین معایب را ازلحاظ سلامتی و ایمنی دارد؛ زیرا تنها روشی است که کارگران از ابتدا تا انتهای عملیات داخل تانک می‌شوند و به‌طور مستقیم در معرض خطرات زیست‌محیطی و کار قرار دارند که در حقیقت شبیه مواجهه با همه نوع اتفاقات و بیماری‌های حاصل از هیدروکربن‌های فرار، حلال‌های شیمیایی، فلزات سنگین و نفت است و این بالاترین ریسک ممکن در صنعت برای چشم و پوست کارگران حتی با پوشیدن لباس‌های با ایمنی بالا می باشد. دومین نکته سختی کار با تجهیزات سنگین و دست‌وپا گیر در داخل تانک و احتمال بروز حوادث فیزیکی در شرایط فضای بسته و تاریک و بدون اکسیژن هوا است و عدم امکان کنترل از بیرون نیز به معایب این روش از لحاظ سلامتی و ایمنی افزوده است. سومین موضوع پایین بودن سطح ایمنی در این روش، نبود تجهیزات مناسب ضد حریق و انفجار در حین کار می‌باشد زیرا پیوسته فضای داخل تانک با مواد فرار نفتی آتش‌گیر و انفجاری پر می‌شود و هرلحظه خطر انفجار و آتش گرفتن وجود دارد. در این روش هیچ‌گونه شواهد مثبتی دال بر سلامتی و ایمنی وجود ندارد به همین خاطر تقاضای دنیا حرکت به سمت جایگزینی روش‌های دیگر مثل اتوماتیک و رباتیک رو به فزونی است.

روش اتوماتیک: این روش از لحاظ توسعه سلامت و ایمنی عملیات نسبت به روش دستی یک مرحله جلوتر است. تمام تجهیزات در فضای باز بدون خطر انفجار بارگذاری می‌شوند. تمام حلال‌ها، مواد شیمیایی و محلول‌های پاک‌کننده از طریق جت نازل‌ها روی لجن‌ها پاشیده می‌شود و جایگزین روش پاشش مستقیم این مواد توسط کارگران در روش دستی است. لجن نفتی بعد از نرم شدن توسط پمپ‌های خلأ به بیرون تانک مکیده می‌شوند و کل عملیات در فضای بسته تانک بدون نیاز به ورود کارگر به داخل تانک انجام می‌شود. اکسیژن اتمسفر داخل تانک نیز قبل از عملیات با گاز ازت به حداقل ۸ درصد می‌رسد تا حداکثر ایمنی به خاطر احتمال انفجار و آتش‌سوزی حاصل گردد و در طول عملیات از اتاق کنترل رصد می‌شود و اگر آلارم خطر به صدا درآید بلافاصله عملیات متوقف می‌شود.

ازلحاظ ایمنی روش اتوماتیک در مقایسه با روش دستی هیچ عیبی ندارد اما در مقایسه با روش رباتیک، تنها عیب آن این است که در پایان عملیات در صورت وجود بقایای لجن نفتی و جامدات آلی و معدنی مثل شن و ماسه و گل‌ولای روی کف و دیواره‌ها و پایه‌های نگهدارند سقف، نیاز است که کارگران وارد تانک شوند البته خطرات و ریسک انفجار و آتش‌گیری تقریبا صفر است و نیاز به تجهیزات ماسک و کپسول اکسیژن و ... نیست.

روش رباتیک: درروش رباتیک حداکثر نکات ایمنی و سلامتی نسبت به سایر روش‌ها رعایت می‌شود. مزایای این روش را این‌طور می‌توان خلاصه کرد:

۱-در هیچ مرحله‌ای از عملیات پاک‌سازی نیاز به ورود کارگر به داخل تانک نیست.

۲- نیروی حرکت و پیشران تمام تجهیزات هیدرولیکی است.

۳- هیچ بخش الکتریکی وارد تانک نمی‌شود.

۴- خارج‌سازی اکسیژن داخل تانک با ازت نیاز نمی‌باشد.

۵- قابلیت بارگذاری سیستم در فاصله ۱۵۰ متری از تانک‌های ذخیره امکان‌پذیر است در حالیکه درروش های دیگر این فاصله جهت رعایت ایمنی باید بیشتر باشد.
۶- بارگذاری تجهیزات روی هر نوع زمینی در اطراف تانک ذخیره امکان‌پذیر است و هیچ مشکلی در جریان به وجود نمی‌آید.
۷- کل تجهیزات در کامیون‌های کوچک ذخیره‌شده و به‌خوبی بارگذاری می‌شوند.
با توجه به مزایای ایمنی و سلامتی این روش، مشخص است که هیچ‌گونه معایبی نسبت به دو روش دیگر وجود ندارد و ایمن‌ترین روش موجود در بازار خدمات تخصصی است.

۳-۴-اثرات زیست‌محیطی روش‌ها

روش دستی: علاوه بر معایب ایمنی، سلامتی و کارایی کم، این روش ازلحاظ تأثیرات زیست‌محیطی هم با مشکلات جدی مواجه است. به خاطر اینکه سیستم پاک‌سازی در جریان محیط باز انجام می‌گیرد و همواره محیط در معرض آلودگی‌هایی چون ضایعات نفتی با ریسک بالا از تمامی بخش‌های عملیات مانند تجهیزات ورودی به داخل تانک، وسایل محافظتی، ابزارها و ... به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم قرار دارد. از طرف دیگر مصرف آب و آلودگی‌های حاصل از شستشوی تانک‌ها نسبت به روش‌های دیگر بیشتر است چون آب در چرخه بسته عملیات نمی‌شود و تصفیه آب مشکل است. مشکل دیگر محیط زیستی این روش نامعلوم بودن سرنوشت نهایی لجن‌های نفتی منتقل‌شده به بیرون تانک است که مدت‌زمان زیادی بلاتکلیف روی سطح زمین یا داخل مخازن ذخیره دیگر انباشته می‌شود در این مدت‌زمان نامعین هیدروکربن‌های سبک از لجن‌ها بخار شده و باعث آلودگی هوا می‌شود و در صورت نپوشاندن سطح لجن‌ها و ریزش باران باعث نشت مواد نفتی به زمین و به‌تبع آن آلودگی خاک یا آب‌های زیرزمینی می‌شوند.
روش اتوماتیک: میزان نشر آلودگی در این روش در مقایسه با روش دستی به علت بسته بودن سیکل پاک‌سازی کمتر است. ضایعات جامد لجن (اغلب شن و ماسه) بعد از جداسازی، شستشو و تصفیه نهایی و عاری شدن از هرگونه آلودگی‌های هیدروکربنی به‌صورت پسماندهای غیر سمی در زیرزمین دفن می‌شوند. آب شستشوی تانک‌ها نیز درنهایت تصفیه‌شده و با مجوز سازمان محیط‌زیست برای آبیاری فضای سبز و کارهای شستشو و کاربردهای دیگر استفاده می‌شود.
روش رباتیک: در کل مزایای روش رباتیک شبیه روش اتوماتیک است و تفاوت چندانی ندارد چون در سیکل بسته انجام می‌شود.

۴-۴- هزینه روش‌ها

روش دستی: عمده هزینه‌های این روش هزینه پرسنلی و مدیریت لجن‌های منتقل‌شده به بیرون می باشد. انواع هزینه‌های پرسنلی به‌صورت خلاصه به شرح زیر است:
۱- حقوق و دستمزد کارگر گران پیمانکاری که تعدادشان نسبت به دو روش دیگر خیلی زیاد است و علت تعداد زیاد کارگران سختی کار کندن لجن و انتقال به بیرون با ابزارهای ساده و ابتدایی است و از طرفی چون محیط داخل تانک سمی و خطرناک است کارگران می‌بایست به خاطر رعایت سلامتی و ایمنی‌شان زودبه‌زود تعویض شده و نیروی تازه‌نفس جایگزین گردد.

۲- حقوق و دستمزد تکنسین‌های فنی که بیرون از تانک ذخیره باید شرایط داخل تانک را لحظه‌به‌لحظه رصد کنند.
۳- حقوق و دستمزد گروه اورژانس که از ابتدا تا پایان کار باید حاضر باشند تا در صورت بروز حادثه امدادرسانی کنند.
۴- حقوق و دستمزد تکنسین‌های ایمنی که در طول عملیات باید حضور داشته باشند که در صورت بروز حادثه مشکل را بلافاصله برطرف کنند.
۵- پرداخت هزینه‌های ویژه مربوط به زمان‌های اضافه‌کار، کار شبانه، آخر هفته، تعطیلات عمومی که به حقوق و دستمزد پرسنل اضافه می‌شود.
۶- اجاره کامیون خلأ (لجن کش ها) برای کشیدن لجن از داخل به بیرون تانک و سایر هزینه‌های اضافی دیگر.
بخش دوم هزینه‌ها مربوط به مدیریت لجن‌های انتقال‌یافته به بیرون است؛ زیرا در این روش هیچ‌گونه عملیات درمان و رفتار مثبتی جهت بازیافت مواد نفتی در حین عملیات صورت نگرفته است و این لجن‌ها حاوی هیدروکربن‌های ارزشمند نفتی است. در این روش حجم آب مصرفی توسط واتر جت‌ها برای نرم کردن لجن‌ها زیاد است. در صورتیکه برای این لجن‌های پاک‌سازی‌شده کاربردی پیدا نشود و مجبور به دفع این ضایعات شوند هزینه رفتار با این پسماندهای نفتی بسیار بالا خواهد شد. به‌عنوان نمونه شرکت MIRRICO MARTIN برای روش دستی برآورد کرده است که هزینه پاک‌سازی هر مترمکعب لجن از تانک ۱۰۰ دلار و مدیریت پسماند لجن‌های پاک‌سازی‌شده ۱۲۷/۵ دلار و درمجموع هزینه تمام‌شده ۲۲۷/۵ دلار بر هر مترمکعب خواهد بود[۱۰].
روش اتوماتیک: در مقایسه با روش دستی هزینه یا قیمت این روش بالاتر است. هزینه مدیریت لجن‌های پاک‌سازی‌شده صفر اما در حقیقت این هزینه به بخش‌های بازیافت و جداسازی مواد نفتی و آب و جامدات از یکدیگر اختصاص داده‌شده است. علاوه بر این مزایای زیادی این روش ازلحاظ کارایی، ایمنی کارگران و محیط‌زیست و تکنولوژی باعث گران‌تر شدن روش شده است. طبق برآورد شرکت اورکو هزینه پاک‌سازی یک مترمکعب لجن از تانک ۲۵۴/۲۵ دلار است که کمی بیشتر از روش دستی است اما در مقابل سودی که براثر برگشت نفت حاصل از بازیافت به صاحب تانک می‌رسد، نشان می‌دهد که این هزینه نقش خیلی کوچکی برای صاحبان تانک‌ها دارد. به‌عنوان‌مثال شرکت اورکو در یک بررسی میدانی برای یک تانک ۱۸۵۰۰ مترمکعبی این‌طور گزارش کرده است که در روش اتوماتیک مدت‌زمان پاک‌سازی این تانک ۱۵ روز بوده که کاهش چشمگیری در مقابل روش دستی دارد و ۱۸۳۲ مترمکعب لجن در عملیات پاک‌سازی به بیرون منتقل شد که خوشبختانه ۱۷۹۱ مترمکعب آن بازیافت گردید. با احتساب فروش بشکه‌ای ۶۰ دلار، درامد حاصل از فروش نفت بازیافت شده ۶۷۵۹۰۰ دلار خواهد شد که در مقابل هزینه پاک‌سازی ۴۶۵۷۸۶ دلار می‌شود. اختلاف هزینه و درامد حدود ۲۱۰۱۱۴ دلار می‌شود که یک پس‌انداز عالی پول و زمان برای صاحب تانک به شمار می‌رود [۳۰].
روش رباتیک: هزینه روش رباتیک نسبت به اتوماتیک کمتر ولی نسبت به دستی گران‌تر است. هرچند فرایند پاک‌سازی شبیه اتوماتیک است اما بعضی جزئیات باعث کاهش هزینه درنهایت می‌گردد. مثل کاهش هزینه حمل‌ونقل (۳ تا کامیون کوچک به‌جای ۸ تا کانتینر)، حذف اجاره جرثقیل، کاهش زمان بارگذاری تجهیزات (۴ تا ۸ ساعت به‌جای ۷ روز). از طرف دیگر در این روش اصلا نیازی به ورود کارگر به داخل تانک نیست. تخمین هزینه پاک‌سازی در این روش ۱۵۴,۲۵ دلار به ازاء هر مترمکعب لجن می باشد[۳۱]. به ترتیب هزینه پاک‌سازی روش‌ها را می‌توان این‌طور خلاصه نشان داد:

روش دستی < روش رباتیک < روش اتوماتیک

۱۰۰ دلار/m^3 ۱۵۴/۲۵ دلار/ m^3 ۲۵۴/۲۵ دلار/ m^3

۵- نتیجه‌گیری

روش‌های صنعتی پاک‌سازی تانک‌های ذخیره از لجن‌های نفتی روش دستی، روش اتوماتیک و روش رباتیک هستند. ملاک اصلی برای ارزیابی روش‌ها چهار فاکتور اصلی ایمنی، کارایی، تأثیرات محیط زیستی و قیمت تمام‌شده عملیات می باشد.

۱- ازلحاظ ایمنی روش دستی کمترین و روش رباتیک بالاترین سطح ایمنی را دارد. خطرناک‌ترین و مضرترین روش دستی است چون از آغاز تا پایان کار، کارگران داخل تانک هستند درروش رباتیک در هیچ مرحله‌ای کارگری وارد تانک نمی‌شود. روش اتوماتیک بین این دو حالت است.

۲- کارایی روش که بر اساس پاک‌سازی لجن در واحد زمان تعریف می‌شود برای روش سنتی پایین است و جزو کندترین و طاقت‌فرساترین روش‌های پاک‌سازی محسوب می‌شود. سیستم‌های پاک‌سازی اتوماتیک و رباتیک ازلحاظ زمان انحراف کمی از یکدیگر دارند و کیفیت کارشان تقریبا شبیه به هم می‌باشد.

۳- ازنظر اثرات زیست‌محیطی، دو روش اتوماتیک و رباتیک در سیستم جریان بسته انجام می‌شوند و سیستم بازیافت خوبی دارند. تنها سیستمی که در جریان عملیاتی باز و بدون هرگونه بازیافت نفت از ضایعات تولیدشده انجام می‌شود، روش دستی است که نه‌تنها کارگران در معرض خطر هستند بلکه محیط‌زیست هم در امان نیست.

۴- هزینه روش اتوماتیک نسبت به دو روش رباتیک و دستی بیشتر است اما بازیافت مواد در این روش کامل‌تر و بهتر است و درامد حاصل از فروش مواد بازیافتی حداقل نیمی از هزینه پاک‌سازی را پوشش می‌دهد.

۵- روش‌های مدرن در حوزه پاک‌سازی تجاری تانک‌های ذخیره بر اختراعات و نوآوری‌های جدیدی تمرکز دارند که عملیات پاک‌سازی در زمان کوتاه، اتوماتیک و بدون نیاز به ورود کارگر به داخل تانک و قابلیت بازیافت تمام هیدروکربن‌های ارزشمند از ضایعات تولیدشده را با کمترین قیمت انجام شود.

۶- منابع

[۱] رنجکش ع.، همکاران، "بازیافت لجن‌های نفتی راهکاری به‌منظور حفاظت از محیط‌زیست"، ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، تهران، ۱۳۹۱.

[۲] نوری م.، ۱۳۹۴، "بیوسورفکتانت روشی نوین در لجن زدایی از مخازن نفتی"، پنجمین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی ، تهران.

[3] Guangji Hu, Jianbing Li, Guangming Zeng, “Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 261, pp. 470– 490, 2013.

[4] Chun Hwa See, Wasan Saphanuchart, Ming Hoong Looi, Yang Loong Chong, “Method of removing oil sludge and recovering oil from oil sludge with nanoemulsion surfactant system”, US Patent 20150068950, 2015.

[5]Al-Futaisi, A.; Jamrah, A.; Yaghi, B.; Taha, R., “Assessment of alternative management techniques of tank bottom petroleum sludge in Oman”, *J. Hazard. Mater*. 141, pp. 557–564, 2007.

[6] Heidarzadeh, N.; Gitipour, S.; Abdoli, M.A. “Characterization of oily sludge from a Tehran oil refinery”, *Waste Manag. Res.* 28, pp. 921–927, 2010.

[7] Mansur, A., "Recovery and Characterization of Oil from Waste Crude Oil Tank Bottom Sludge from Azzawiya Oil Refinery in Libya", *J. Adv. Chem. Eng*, 5, 05, 2015.
[8] NuovaSaimar Storage Tank Cleaning-Traditional Tank Cleaning Method. Available online: https://www.nuovasaimar.it/en/our-services/tank-cleaning/ (accessed on 4 March 2020).
[9]TRADEBE TRADITIONAL TANK CLEANING. Available online: https://www.tradebeindustrialservices.com/traditional-tank-cleaning (accessed on 3 March 2020).
[10] Chrysalidis, A.; Kyzas, Gz., "Applied Cleaning Methods of Oil Residues from Industrial Tanks, processes", 8, 569, 2020.
[11] Guangji Hu, Jianbing Li, Guangming Zeng, "Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 261, pp. 470– 490, 2013.
[12] J. Liu, X. Jiang, L. Zhou, X. Han, Z. Cui., "Pyrolysis treatment of oil sludge and model-free kinetics analysis", *J. Hazard. Mater*., vol. 161, pp. 1208–1215, 2009.
[13] Chang C.Y, Shie J.L., Lin J.P., Wu C.H., Lee D.J., Chang C.F., "Major products obtained from the pyrolysis of oil sludge", *Energ. Fuel*, vol. 14, pp. 1176–1183, 2000.
[14] Karayildirim T., Yanik J., Yuksel M., Bockhorn H., "Characterisation of products from pyrolysis of waste sludge", *Fuel*, vol. 85, pp. 1498–1508, 2006.
[15] Fang C.S., P. Lai M.C., "Microwave heating and separation of water-in-oil emulsion, J. Microw. Power Electrom", *Energy*, vol. 30, pp. 46–57, 1995.
[16] Ramaswamy D., Kar D.D., De S., "A study on recovery of oil from sludge containing oil using froth flotation", *J. Environ. Manage*., vol. 85, pp. 150–154, 2007.
[17] Yang L., Nakhla G., Bassi A., "Electro-kinetic dewatering of oily sludges", *J. Haz-ard. Mater.* 125, pp. 130–140, 2005.
[18] Li J., Song X., Hu G., Thring R.W., "Ultrasonic de-sorption of petroleum hydro-carbons from crude oil contaminated soils", *J. Environ. Sci. Health A*; 48(11), pp. 1378-89, 2013.
[19] Zadson d. Franco, Carlos N. Khalil, Oswaldo d. Pereira, Jr., "Process for the thermo-chemical cleaning of storage tanks", US Patent 5580391, 1996.
[20] Nelson O. Rocha (Petrobras), Carlos N. Khalil (Petrobras), Lúcia F. Leite (Petrobras), Andre M. Goja(Petrobras)., "Thermochemical process to remove sludge from storage tanks, SPE Projects, Facilities & Construction", *Society of Petroleum Engineers,* 2009.
[۲۱] ابراهیمی ف.، "استفاده از نانوبیوسورفکتانت جهت کاهش ویسکوزیته لجن نفتی"، پایان‌نامه ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۹۱.
[22] Al-Dousary, S.; Dharan, G.P.T., "Implementation of Non-Man Entry Technology—An Automated Technology for De-sludging & Cleaning of Tanks", In SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference; Society of Petroleum Engineers: Mishref, Kuwait, p. 9, 2015.
[23] Oreco Tank Cleaning Process and Services. Available online: https://www.oreco.com/solutions/crude-oiltank-cleaning/the-tank-cleaning-process/ (accessed on 3 March 2020).
[24] SlideShare Blabo Process. Available online: https://www.slideshare.net/Oreco/blabo-process (accessed on 3 March 2020).
[25] Oreco Customer Cases. Available online: https://www.oreco.com/references/customer-cases/ (accessed on 4 March 2020).
[26] Group, A.T.K. Equipment Set for the Remotely-Controlled Removal of Sludge from Oil Tanks. Available online: https://www.adroctech.com/ (accessed on 14 March 2020).
[27] MARTin, MARTin-Innovative solution for no-man entry cleaning of tanks. Available online:https://www.mirrico.ru/en/services-products/products/robotic-method-of-stripping-petrochemical-equipmen (accessed on 14 March 2020).
[28] Tech, M.O. Martin: Innovative Robotic. Unit for Cleaning Oil Tanks. Available online: https://martinoil.tech/(accessed on 14 March 2020).

[29] MIRRICO Comparative Calculation of the Economic Eciency of Manual and Robotic Methods for Cleaning Oil Tanks. Available online: https://www.mirrico.ru/en/services-products/products/robotic-method-ofstripping-oil-field-equipment-fr/#calc (accessed on 20 March 2020).
[30] ORECO Changing from Manual to Automated Tank Cleaning Saved Time and Money. Available online:https://www.oreco.com/media/1093/cases-fawley-uk.pdf (accessed on 29 March 2020).
[31] StockExpo MARTIN—Mobile Robotic Tank Cleaning Solution. Available online: https://www.stocexpo.com/en/products/martin-mobile-robotic-tank-cleaning-solution/ (accessed on 19 March 2020).