تاثیر پایداری ستون آب دریا بر دینامیک حرکت و ارتفاع نفوذ پلومهای نفتی رها شده از بستر

بهروز بافنده[۱] ، عباسعلی علی اکبری بیدختی[۲*]، کامران لاری[۳]، مجتبی عظام[۴]

[۱] دانشجوی دکتری تخصصی فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ behroozbafandeh@gmail.com

[۲] استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ bidokhti@ut.ac.ir

[۳] دانشیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال؛ k_lari@iau-tnb.ac.ir

[۴] استادیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ ezam@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

کلمات کلیدی:
مکانیک سیالات
ارتفاع حبس پلوم
آلودگی
چینه بندی

چکیده

نظر به گسترش روز افزون پروژه های استخراج نفت در دریا و به منظور شناخت بیشتر رفتار دینامیکی پلوم ناشی از نشت احتمالی نفت از بستر و تاثیرات تغییر در پایداری استانیکی ستون آب بر رفتار دینامیکی پلوم نفتی ناشی از نشت و ارتفاع نفوذ پلوم، مجموعه ای از آزمونهای تجربی در حوضچه ای شفاف با لایه بندی چگالی پایدار انجام گردید. نتایج این آزمونهای به روش عددی با ابعاد و شرایط محیط دریای کم عمق تطبیق داده شده است و نتایج حاصل از هر دو روش به صورت بی‌بعد تبدیل گردید. مشاهده شد که کاهش پایداری استاتیکی آب دریا باعث افزایش ارتفاع نفوذ و کاهش پهنای پلوم آلاینده می‌شود. همچنین مشخص شد که سطح شناوری خنثی بعنوان مشخصه نقطه گذار از فاز حرکت پلوم به فاز پخش و فرارفت در محیط دارای چینه بندی چگالی به نتایج این تحقیق نزدیک است.

The Effect of Water Column Stability on Underwater Oil Blowouts Plume Dynamics and Peeling Height

Behrooz bafandeh[1], Abbasali Aliakbari Bidokhti[2*], Kamran Lari [3], Mojtaba Ezam [4]

[1] Ph.D. Candidate, Faculty of Natural Science and Environmental Engineering, Department of Marine Sciences, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University; behroozbafandeh@gmail.com
[2] Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran; bidokhti@ut.ac.ir
[3] Associate Professor, Department of Physical Oceanography, North Tehran Branch, Islamic Azad University; k_lari@iau-tnb.ac.ir
[4] Assistant Professor, Faculty of Natural Science and Environmental Engineering, Department of Marine Science, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University; ezam@srbiau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 14 Apr. 2019
Accepted: 6 Jul. 2019

Keywords:
Fluid Mechanics
Plume Trapping height
Sea
Pollution
Stratification

ABSTRACT

Considering the increase in number of offshore oil production projects and for better understanding of plume dynamics in accidental underwater oil blowouts, a series of laboratory experiments in a square cross section open top basin were carried out to investigate the effect of changes in seawater stratification and water column stability on plume dynamics and peeling height. Accordingly the open top basin was filled with stratified salt water at different buoyancy frequencies and the results of experiments were numerically expanded to marine condition of shallow waters. Non-dimensionalized form of experimental and numerical results showed that decrease in basin buoyancy frequency increases the plume peeling height and reduces the plume width. Experimental results showed that the neutral buoyancy level was the applicable transition criterion from plume dynamic phase to advective and diffusive phase.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]

۱ - مقدمه

سکو های حفاری و بهره برداری فراساحل در دهه های گذشته بطور گسترده ای در جهان افزایش یافته اند. با وجود پیشرفتهای چشم گیر در تکنولوژی سکوهای حفاری و بهره برداری نفتی، این قبیل فعالیتها همیشه در معرض تهدید خطرات و حوادثی بوده اند که می توانند به فجایع زیست محیطی منجر شوند. عمق دریا، شرایط محیطی و فشار کاری در این سکو ها به نحوی است که نشت نفت می تواند تاثیرات جبران ناپذیری بر محیط زیست دریایی و سواحل مجاور حوضه های نفتی گذارد. یکی از مهمترین حوادث دریایی از این دست، حادثه Deepwater Horizon سال ۲۰۱۰ در خلیج مکزیک است که منجر به نشت نفت از عمق ۱۵۰۰ متری زیر سطح دریا با دبی تقریبی ۸۴۰۰ تا ۹۹۰۰ متر مکعب در روز گردید. [۱ و ۲]

برنامه ریزی پاسخ اضطراری[۱] و طرح عملیات احتمالی[۲] برای مخاطرات حوزه آلودگی دریا بعنوان یکی از ملزومات مدیریت خطر در سکوهای دریایی، به دانش دینامیک سیالات جریانات چند فازی وابسته است. با وجود تلاش‌های قابل توجه در این زمینه تحقیقاتی، به دلیل تعدد و متغیر بودن عوامل تاثیرگذار بر دینامیک سیالات حاکم بر نشت‌های زیر آبی و الگوی حرکت آلاینده‌ها در آب دریا، کماکان دانش مکانیک سیالات برای پیش‌بینی نشت‌های نفت و گاز از بستر دریا محدود است.

علی بیگی وهمکاران [۳] نحوه پخش سیالات حفاری حوزه نفتی را بصورت میدانی مطالعه کردند و رنجبر و شفیعی فر [۴] با استفاده از مدل OSCAR در یک بررسی موردی خروج نفت از کف دریا و به سطح رسیدن آن ناشی از یک حادثه فرضی در خطوط انتقال نفت به جزیره خارک را به روش عددی بررسی نمودند. در مطالعاتی مشابه رضوان دوست و همکاران [۵] خروج احتمالی نفت از چاه های فراساحل در حوضه نفتی خلیج فارس را با مدل OSCAR به روش عددی شبیه سازی کردند و یوسفی آذر دولت آبادی و شفیعی فر [۶]با استفاده از مدل OSCAR تاثیر اضافه شدن گاز به نفت آلاینده در نشت اتفاقی از بستر خلیج فارس را مورد بررسی قرار دادند. عبد معبودی و همکاران [۷] جهت مدلسازی عددی نشت نفت از بستر دریا از روش هیدرودینامیک ذرات هموار[۳] استفاده کردند و با استفاده از آن روش مسیر حرکت لکه نفتی در ستون آب را مطالعه کردند. از طرفی قدیری معصوم و ملماسی [۸] تاثیرات اکولوژیکی ناشی از ریزش نفت در خلیج فارس را بررسی کردند و یوسفی سیاهکلرودی و همکاران [۹] اثر بخشی اقدامات کنترل و مدیریت آلاینده ها در حوادث نشت نفت در خلیج فارس را مطالعه کردند.

سوکولفسکی و آدامز [۱۰ و ۱۱] و سوکولفسکی و همکاران [۱۲] رفتار دینامیکی پلوم نفت و گاز ناشی از نشت از بستر را مطالعه کرده و روابطی تجربی جهت پیش بینی رفتار پلوم در حالات مختلف ۱) محیط دارای لایه بندی چگالیخالص بدون جریانات اقیانوسی، ۲) محیط دارای جریانات اقیانوسی خالص بدون لایه بندی و ۳) تاثیر غالب لایه بندی چگالی در حضور جریانات ضعیف اقیانوسی ارائه کردند. لیمانتو و همکاران [۱۳] و نیز ژائو و همکاران [۱۴] تاثیر اندازه حبابها و قطارات نفت را بر دینامیک حرکت پلوم مطالعه کردند و روابط تجربی جهت پیش بینی اندازه ذرات ارائه کردند.

از جمله عوامل تاثیرگذار در پیش‌بینی رفتار پلوم آلاینده ناشی از نشت نفت از بستر دریا وجود چینه‌بندی آب دردریا است. تغییر در چینه‌بندی آب می‌تواند کاهنده و یا افزاینده سرعت حرکت پلوم‌های نفتی وتعیین کننده نحوه پراکندگی پلوم‌ها در حجم و متعاقباً سطح آب دریا شود و بر دینامیک حرکت پلوم، زمان به سطح رسیدن آلودگی، مکان به سطح رسیدن آلودگی و ابعاد محیط آلوده شده تاثیرگذارد.

با توجه به این که محیط آب دریا می تواند لایه‌بندی دما – شوری داشته باشد و از طرفی این لایه‌بندی معمولا ثابت و پایدار نیست، لذا در شرایط مختلف لایه بندی آب دریا، ارتفاع و زمان توقف نفوذ پلوم نفتی متغییرخواهد بود. بیشینه ارتفاع نفوذ، ارتفاعی است که حرکت دینامیکی پلوم در آنجا به پایان می‌رسد و فراتر از آن ارتفاع، ذرات نفت تحت تاثیر نیروی شناوری خود حرکت می‌کنند و بنابراین حرکت آلاینده تحت تاثیر پخش و فرا رفت قرار می‌گیرد [۱۵]. لالیت و همکاران [۱۶] از مقایسه نتایج مدل عددی پلوم ناشی از یک حالت ثابت رها سازی نفت و گاز از بستر دریا در چندین حالت مکانی، زمانی و جوی مختلف سه مشخصه جهت تعیین نقطه گذار از فاز پلوم به فاز فرارفت را بصورت موارد زیر پیشنهاد کردند و مشخص نمودند که مشخصه های مختلف نقطه گذار می توانند نتایج متفاوتی را تولید کرده و هریک از آن‌ها در حالات و زمان‌های خاصی می‌توانند به واقعیت نزدیک‌تر باشند الف) سطح شناوری خنثی پلوم، که به عنوان ارتفاعی از بستر که در آن چگالی پلوم با آب دریا برابر می‌شود و پس از آن حرکت ذرات توسط سرعت شناوری خنثی خودشان انجام می‌گیرد. ب) حالت سرعت شناوری، که در آن سرعت ذرات نفت و گاز در پلوم از سرعت کلی پلوم و جت به سرعتی معادل سرعت شناوری طبیعی‌شان که به اندازه ذرات و حباب‌ها در سه حالت بزرگترین اندازه ذرات، اندازه میانگین ذرات و اندازه کوچک‌ترین ذرات بستگی دارد رسیده باشد. ج) حالت سرعت صفر، که به حالتی گفته می‌شود که در آن سرعت پلوم به صفر برسد[۱۶].

هدف از این تحقیق مطالعه تاثیر چینه بندی آب دریا بر خصوصیات دینامیکی حرکت رو به بالای پلوم‌های آلاینده می‌باشد که نتایج آن علاوه بر کاربرد در زمینه آلودگی های نفتی می تواند

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]

در فرآیند طراحی و پیش بینی مسیر حرکت آلاینده در سیستمهای دفع فاضلاب در بستر دریا نیز استفاده شود.

۲ - رشد پلوم در محیط لایه بندی شده

پلوم های تلاطمی در اثر فرایند درون آمیختگی سیال محیط به داخل پلوم با افزایش فاصله از منشا رشد می کنند و بدین صورت در مسیر رشد، مرز پلوم توسط پیچک‌های بزرگ و فرایند اختلاط مشخص می شود. پیچک‌های بزرگ باعث درون آمیختگی سیال محیط به داخل پلوم و اختلاط کوچک مقیاس سبب درهم آمیختگی در مرز این پیچک‌ها می شود و در نتیجه آن پهنای پلوم با فاصله از منبع افزایش می یابد [۱۷]در همین حین سرعت ناشی از تکانه اولیه پلوم با فاصله از منبع تبدیل به سرعت ناشی از اختلاف چگالی سیال پلوم به محیط اطراف می شود. در مواردی که پلوم در محیط لایه‌بندی شده دارای پایداری ($N \neq 0$) حرکت کند، سرعت بالاروی پلوم روند کاهشی خود را ادامه می دهد تا نهایتا در ارتفاعی قابل محاسبه رشد عمودی پلوم متوقف می‌شود و سرعت بالاروی آن به صفر میرسد. بیشینه مقداری که پلوم در جهت قائم رشد می‌کند تقریبا معادل است با [۱۸]:

$$Z_{max} = 5\left(\frac{F_0}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} N^{-\frac{3}{4}} \qquad (۱)$$

با فرض این‌که فرکانس شناوری محیط ، N ، تقریباً ثابت باشد با در نظر گرفتن شار شناوری، F_0 ، در چشمه می‌توان پارامترهای بی بعد پلوم، به ترتیب ارتفاع، پهنا، سرعت قائم و شناوری را برای توزیع گوسی به شکل زیر معرفی کرد [۱۸].

$$Z = 0.41 \ \propto^{-\frac{1}{2}} F_0^{\frac{1}{4}} N^{-\frac{3}{4}} Z_1 \qquad (۲)$$

$$b = 0.82 \ \propto^{\frac{1}{2}} F_0^{\frac{1}{4}} N^{-\frac{3}{4}} b_1 \qquad (۳)$$

$$w = 1.158 \ \propto^{-\frac{1}{2}} F_0^{\frac{1}{4}} N^{\frac{1}{4}} w_1 \qquad (۴)$$

$$g' = 0.819 \ \propto^{-\frac{1}{2}} F_0^{\frac{1}{4}} N^{\frac{5}{4}} g_1' \qquad (۵)$$

که اندیسهای (۱) معرف پارامترها در چشمه هستند و $F_0 = g'Q$ ، $N^2 = [-g/\rho_r(\partial\rho_a/\partial z)]$ و Q دبی حجمی چشمه، ρ_aچگالی محیط، ρ_r یک چگالی مرجع و g' شتاب کاهش یافته گرانشی و $\partial\rho_a/\partial z$گرادیان قائم چگالی محیط است. پارامترهای بی بعد پلوم نیز شامل عدد رینولدز $Re=wb/v$ که v گرانروی شاره پلوم است و عدد فرود آن $Fr=w/Nb$ است. در این تحقیق سعی شده است مقادیر بی بعد تعیین کننده رفتار پلوم برای مرحله جت واقعی [۱۴] و آزمایشگاهی یکسان باشند تا همانندی دینامیکی برقرار باشد[۱۲].

سوکولوفسکی و آدامز [۱۱] سرعت لغزش[۴] یا همان اختلاف سرعت بالاروی قطرات یا حبابهای درشت و سبک آلاینده نسبت به سرعت بالاروی پلوم (u_s) را نیز در کنار فرکانس شناوری و شار شناوری از عوامل تعیین کننده بیشینه ارتفاع نفوذ پلوم چند فازی پیش از فروریختن[۵] (h_p) آن دانسته و عدد بی بعد سرعت مشخصه $U_N = u_s/(F_0N)^{\frac{1}{4}}$ را تعیین کننده رفتار دینامیکی پلوم معرفی کردند. آنها همچنین رابطه (۶) را جهت تعیین ارتفاع نفوذ پلوم معرفی کردند [۱۱].

$$h_p = 5.2\exp\left[-\left(\frac{u_s}{(F_0N)^{\frac{1}{4}}} - 1.8\right)^2 \Big/ 3.2^2\right]\left(\frac{F_0}{N^3}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad (۶)$$

در این روابط $g' = g(\rho_a - \rho_0)/\rho_r$ و ρ_aچگالی محیط، ρ_0 چگالی سیال پلوم و ρ_r یک چگالی مرجع می باشد.

۳ - مطالعه روند رشد و ارتفاع نفوذ پلوم به روش آزمایشگاهی

در این تحقیق ظرف شفافی به ابعاد ۱۲۰×۴۵×۴۵ سانتیمتر از جنس پلکسی گلاس ساخته شد تا درون آن لایه‌بندی محیط آزمایش به صورت لایه‌بندی شوری آب با فرکانس‌های شناوری مختلف ایجاد شود. جهت ایجاد لایه‌بندی از روش ظروف مرتبطه آب شور و شیرین استفاده شد[۱۸]. بدین صورت که دو ظرف به ظرفیت هریک ۲۰۰ لیتر در ارتفاع ۲/۵ متری از کف ظرف شفاف فوق الذکر یکی حاوی آب شیرین و دیگری حاوی آب شور نصب گردیدند. درون مخزن آب شور یک همزن برقی که از سقف آن شناور شده بود به صورت عمودی قرار گرفت تا وظیفه یکنواخت کردن پیوسته و سریع محتویات ظرف آب شور را به انجام رساند. ظروف آب شور و شیرین از کف به وسیله یک شیر ارتباطی دستی به یکدیگر متصل شده و یک خروجی دیگر از کف ظرف آب شور ایجاد گردید که به وسیله یک شلنگ شفاف و سبک آب را به مخزن شفاف برساند. مسیر آب شور ورودی به مخزن شفاف از طریق شلنگ شفاف و سبک مذکور بوده که به وسیله یک قطعه اسفنج ۱۰×۱۰×۴۰ سانتیمتر می‌توانست بر روی آب شناور گردد. بر روی سطح اسفنج و در مرکز سطح آن سوراخی به عمق ۲ سانتیمتر و به قطر داخلی معادل قطر خارجی شلنگ ایجاد شد تا به‌وسیله چسب شلنگ درون آن نصب گردد. هدف از این کار توزیع یکنواخت آب ورودی به مخزن از طریق اسفنج شناور بوده تا

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

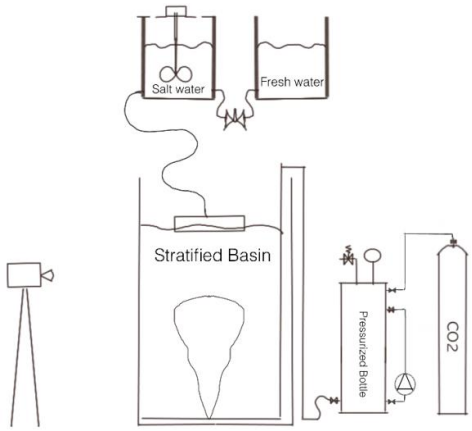
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]

از ایجاد اغتشاش و بهم‌آمیختگی محتویات مخزن شفاف جلوگیری شود.

برای ایجاد لایه‌بندی هر دو ظرف آب شور و شیرین نصب شده در ارتفاع ابتدا به میزان ۱۵۰ لیتر با آب شیرین، آب‌گیری می‌شدند. مجموع آب درون این مخازن تقریباً ۱۰۰ لیتر بیشتر از ظرفیت آب مورد نیاز در ظرف شفاف در نظر گرفته شد تا از عملکرد بی‌نقص همزن در طول لایه‌بندی محیط اطمینان حاصل گردد. پس از تکمیل آب‌گیری مخازن، محتویات مخزن آب شور با اضافه کردن مقادیر مورد نظر نمک دریایی و بهم زدن پیوسته و سریع توسط همزن برقی تا اندازه‌های مختلف مورد نیاز هر مرحله از آزمایش شور می‌گردید. در این روش لایه‌بندی، آب شور تهیه شده در مخزن آب شور از طریق شلنگ شناور بر اسفنج متخلخل با نیروی جاذبه و دبی کنترل شده توسط شیر نصب شده در خروجی مخزن آب شور، به آرامی وارد مخزن شفاف می‌گردید و با بالا آمدن سطح آب در مخزن شفاف اسفنج شناور شده و بالا می‌آید. با پایین آمدن اندک سطح آب در مخزن آب شور و متناسب با مقدار کاهش سطح، مقداری از آب شیرین از طریق مسیر ارتباطی دو مخزن به کف مخزن آب شور وارد می‌شود و با توجه به عملکرد پیوسته همزن نصب شده در مخزن آب شور، باعث کاهش شوری آب در مخزن آب شور می‌گردد. انتقال آب شیرین به مخزن آب شور و متعاقباً کاهش شوری محتویات مخزن آب شور، متناسب با مقدار آب خروجی از مخزن آب شور بوده و پیوسته ادامه دارد.

جهت ایجاد پلوم‌های آلاینده در محیط آزمایشی از لوله‌ای مسی به قطر ۶/۳۵ میلیمتر استفاده شد و به منظور جلوگیری از برگشت آب از مخزن شفاف به بیرون، لوله مسی ابتدا تا ارتفاعی بالاتر از حداکثر ارتفاع سطح مخزن بالا رفته و سپس خم شده و تا کف مخزن پایین می‌آمد. لوله مسی قطر کف مخزن را طی کرده و مجددا تا ارتفاع مخزن بالا آمده و بسته شد. در محل کف مخزن شفاف و دقیقاً در مرکز سطح آن سوراخی دایره شکل به قطر داخلی ۳/۲۵ میلیمتر در لوله مسی و دقیقاً به‌صورت عمودی رو به بالا ایجاد گردید. شعاع خم هر کدام از زانوهای ایجاد شده در مسیر لوله مسی ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده تا سیال پلوم در طی مسیر دچار تغییرات فشار و سرعت ناگهانی نگردد. به منظور حفظ فشار و دبی ثابت در منشاء پلوم از یک کپسول به حجم تقریبی ۳۰ لیتر نصب شده بر سطح زمین استفاده شد که در تمام طول آزمایش فشار ثابت گاز دی‌اکسیدکربن تامین شده توسط یک کپسول تحت فشار و کنترل شده توسط دو رگلاتور بر سطح مایع درون مخزن، فشار خروجی آن را ثابت نگهداری می‌کرد. حفظ فشار ثابت استاتیک بر سطح سیال باعث تامین و ثبات تکانه اولیه پلوم در طول آزمایش می‌گردد. این امر با استفاده از دو رگلاتور فشار استفاده شده در کپسول آزمایش میسر گردید که یکی از آن‌ها فشار ورودی گاز بر سیال را کنترل می کرد و دیگری در صورت افزایش فشار استاتیک بر سطح آب آن را در فضای آزاد رها کرده و بدین صورت به طور پیوسته فشار استاتیک را کنترل می‌کرد. شکل ۱ چیدمان تجهیزات آزمایش را نمایش می‌دهد.

با درنظر گرفتن کلیه اتصالات لوله کشی بکار رفته در مسیر انتقال سیال به بستر مخزن شفاف (از کپسول تحت فشار تا دهانه پلوم) افت فشار سیال و تغییرات سرعت سیال در طول مسیر و نهایتاً سرعت اولیه در دهانه پلوم محاسبه گردید که در جدول ۱ نشان داده شده است.



الف

ب

شکل ۱- نمای شماتیک (الف) و تصاویر (ب) چیدمان مطالعه آزمایشگاهی

در این سری آزمایشها، با توجه به گزارش مطالعات پیشین در خصوص فازهای تزریق مخلوط مایع و گاز که عموماً فاصله ۱۵۰ میلی‌متر را به عنوان فاصله‌ای از نازل که در آن خصوصیات جریان پلوم به صورت پایدار[۶] در خواهد آمد، معرفی کرده بودند [۱۹]، محیط آزمایش تا ارتفاع ۱۵ سانتی متر از بستر حوضچه آزمایشگاهی با آب شور همگن پرمی شد و پس از آن لایه‌بندی شروع می شد. انتخاب این ارتفاع از سیال همگن به گونه ای بود تا به ارتفاع مرحله جت که توسط ژائو و همکاران [۱۴] برابر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]

$2\,M_0^{0.75}/F_0^{0.5}$ معرفی شده و در این سری آزمایشها بین ۱۶/۲ و ۱۶ سانتیمتر است نزدیک و البته کمتر از آن باشد. در مشخصه ناحیه جت فوق الذکر M_0 تکانه اولیه پلوم است.

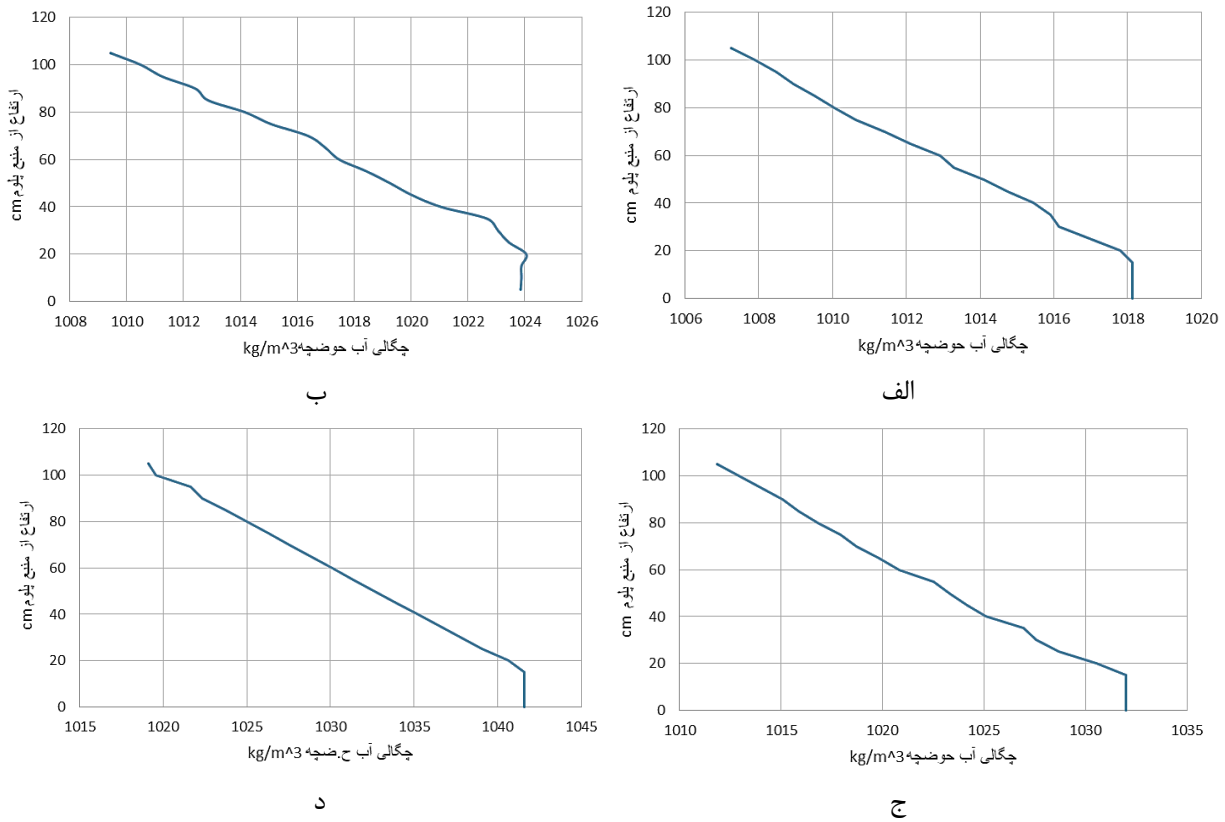
آزمایش‌های بعمل آمده با سرعت شاتر تقریبی ۱۰ فریم بر ثانیه (۵۹۶ fpm) تصویر برداری شد و تصاویر بر صفحه شبکه بندی شده با دقت ۲/۵ میلی‌متر مور مطالعه و بررسی قرار گرفتند. جدول شماره ۲ مشخصه های جریان پلوم آلاینده در آزمایش ها و شکل ۲ پروفیل های عمق شوری در محیط آزمایش را نشان می دهند. مقایسه نتایج آزمایشها در پلومهایی با شار شناوری ثابت در محیطهای همگن و لایه‌بندی شده نشان می دهد که رفتار پلوم در محیط لایه بندی شده تابعی از فرکانس شناوری محیط است.

جدول ۱- دبی، سرعت اولیه، افت فشار خط لوله و عدد رینولدز در دهانه پلوم در آزمایش ها بر اساس فشار مطلق مخزن

فشار مطلق (فشار مخزن+فشار جو) کیلوگرم بر سانتیمتر مربع	دبی (لیتر بر ثانیه)	سرعت اولیه (متر بر ثانیه)	افت فشارمطلق مسیر (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	عدد رینولدز در دهانه پلوم
۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۰/۹	۱۱۱۳۹/۶۳

جدول ۲- مشخصه های جریان در منشاء پلوم آلاینده و لایه بندی محیط در آزمایش های مختلف

شماره آزمایش	فشار مطلق کپسول $\frac{kg}{cm^2}$	دبی ($^l/s$)	سرعت اولیه در دهانه نازل (m/s)	شوری لایه زیرینppt	دما $°C$	فرکانس شناوری s^{-1}
۱	۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۲۶	۲۴/۵	۰/۳۲۸
۲	۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۳۵	۲۱/۴	۰/۳۹۲
۳	۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۴۴	۱۸/۲	۰/۴۳۶
۴	۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۵۶	۱۸/۵	۰/۴۸۵

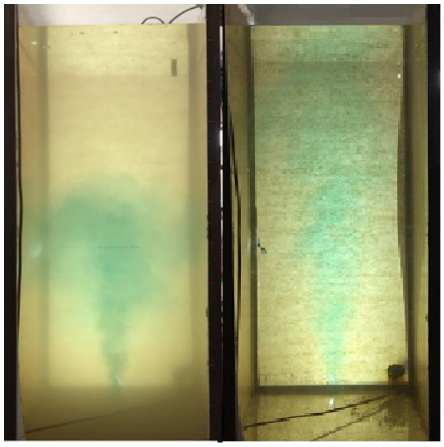


شکل ۲- لایه بندی چگالی محیط در مطالعه آزمایشگاهی ۲۶ppt (الف)، ۳۵ppt (ب)، ۴۴ppt (ج) و ۵۶ppt (د) شوری اضافه بر واحد حجم در بستر حوضچه آزمایش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

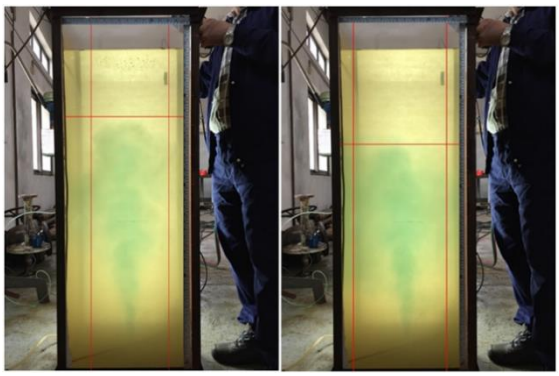
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]

در شکل ۳ تفاوت رفتار پلوم در محیط لایه‌بندی شده و محیط همگن نمایش داده شده است. همانطور که از شکل ۳ بر می آید، وجود لایه‌بندی چگالی پایدار در محیط باعث می‌شود که رشد پلوم در ارتفاع مشخصی متوقف شود که این ارتفاع در اصطلاح ارتفاع نفوذ (فاصله از منبع پلوم) نامیده می‌شود. در بررسی تصاویر بدست آمده از دینامیک حرکت پلوم مشاهده شد که در این ارتفاع سرعت بالا روی پلوم به صفر می‌رسد و پس از آن اندکی بصورت منفی تغییر پیدا می‌کند. بدین معنی که قله پلوم پس از رسیدن به این ارتفاع بر روی پلوم بر می‌گردد و ارتفاع پلوم اندکی کاهش می‌یابد. این حالت که نمونه ای از آن در شکل ۴ آمده است در همه آزمایشهای پلوم تکفاز مایع در محیط دارای لایه بندی چگالی مشاهده شد.



الف ب

شکل ۳- نفوذ محدود پلوم در محیط لایه‌بندی شده پایدار (الف) و به سطح رسیدن پلوم در محیط همگن (ب)



الف ب

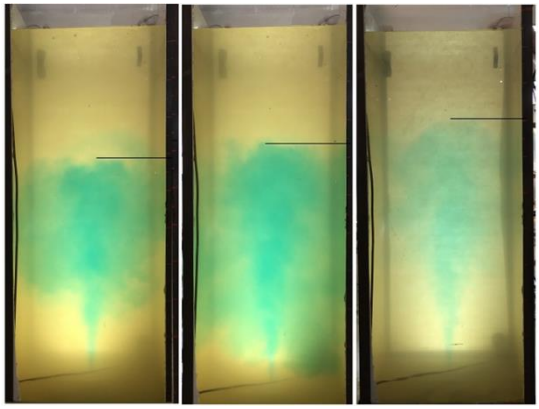
شکل ۴- فرو ریختن قله پلوم در پلوم تک فاز مایع، افزایش مضاعف ارتفاع پلوم (الف) و فروریختن قله پلوم (ب)

چن و همکاران [۲۰] نشان دادند که جریان بالارونده پلوم در حوضچه های همگن بدون لایه بندی چگالی، باعث ایجاد جریانات تلاطمی در حوضچه می گردد که باعث حرکت نوسانی پلوم در حین بالاروی آن می شود. آنها نشان دادند که نسبت ابعادی طول حوضچه به عرض آن تعیین کننده جریانات تلاطمی درون حوضچه همگن می باشد و چنانچه نسبت ابعادی بزرگتر از واحد باشد چندین پیچک معلق در فضا شکل می گیرند. دلنویج و همکاران [۲۱] بصورت آزمایشگاهی و عددی نشان دادند در نسبت های ابعادی ۲ تا ۴/۸ این پیچک ها بصورت عمودی حرکت نمی کنند لیکن در نسبت های ابعادی بیشتر از ۴/۸ این پیچک ها حرکت دینامیکی در راستای عمودی خواهند داشت بطوریکه از سطح شروع می شوند و با گذشت زمان تا بستر پایین می آیند در حالیکه پیچک های جوانی در سطح در حال شکل گرفتن می باشند.

با وجود اینکه در حوضچه های همگن جریانات تلاطمی تابعی از ابعاد حوضچه می باشند، سئول و همکاران [۲۲] نشان دادند که در محیط های دارای چینه بندی چگالی و با نسبت ابعادی بزرگتر از واحد ، پایداری محیط باعث می شود جریانات تلاطمی مرتبط با ابعاد حوضچه کاملا محو شوند و تنها عمال تاثیر گذار بر شکل گیری جریانات تلاطمی ساختار ادی های تشکیل شده ناشی از خود جریان می باشد.

جهت بررسی تاثیر تغییرات لایه‌بندی محیط بر رفتار دینامیکی پلوم آزمایش‌هایی با ثابت حفظ کردن مشخصات پلوم و سیال آلاینده در محیط‌هایی با لایه‌بندی‌های چگالی مختلف انجام شد.

در شکل ۵ با استفاده از تصاویر ثبت شده از لحظه رسیدن پلوم به ارتفاع نفوذ در آزمایشهای مختلف، تفاوت ارتفاع نفوذ پلومهای دارای شار شناوری یکسان در محیط هایی با فرکانس شناوری مختلف نمایش داده شده است.



الف ب ج

شکل ۵ - افزایش ارتفاع نفوذ پلوم تکفاز مایع در محیط لایه‌بندی شده با کاهش فرکانس شناوری و شوری لایه زیرین. آزمایشهای شماره ۱و۳و۴ (الف ۵۶ppt) و (ب۴۴ppt) و (ج ۲۶ppt) شوری اضافه بر واحد حجم در بستر حوضچه

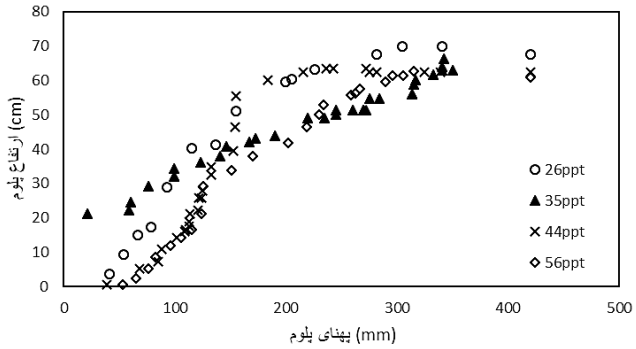
با فرض این‌که کلاهک پلوم بصورت گوسی رشد و حرکت می‌کند و بیشترین ارتفاع در هر تصویر مربوط به خط مرکزی پلوم است، ابعاد ثبت شده‌ی پلوم با روابط مثلثاتی تابع فاصله و زاویه لنز دوربین از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

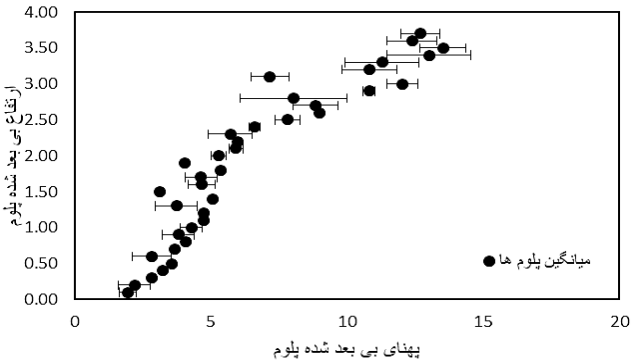
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]

حوضچه آزمایش تصحیح گردید. مقادیر به دست آمده از رفتار پلوم در محیط آزمایشگاه و میانگین مقادیر بی بعد شده در شکل ۶ نمایش داده شده اند.

در نمودار مقادیر بی بعد شده میانگین پهنای پلومها به میانگین ارتفاع پلومها (شکل ۶ ب) نوار خطاهای رسم شده نمایانگر خطای استاندارد میانگین در پهنای بی بعد پلومها می باشند. این خطا در راستای قائم (ارتفاع بی بعد پلومها) مقدار ثابت ۰/۱۵ و وابسته به دقت آنالیز تصاویر فرض شده است. خطای استاندارد میانگین کلی برابر ۰/۴۱۸ و انحراف استاندار ۴/۱۶۵ می باشد.



الف



ب

شکل ۶- نمیرخ پهنای پلوم به ارتفاع پلوم(الف) و نمیرخ میانگین پهنای بی بعد پلوم ها به ارتفاع بی بعد آنها (ب)– نتایج روش آزمایشگاهی – پلوم تکفاز مایع در حوضچه های لایه‌بندی شده پایدار

۴ - مدلسازی عددی دینامیک حرکت پلوم در محیط های دارای لایه بندی چگالی پایدار

در این بخش از پژوهش جهت تعمیم نتایج حاصل از آزمایش به محیط دریایی و بررسی تاثیر لایه‌بندی محیط بر رفتار دینامیکی پلوم به روش مدل‌سازی از نرم افزار OSCAR از مجموعه MEMW سازمان نروژی SINTEF استفاده گردیده است. این نرم افزار مدل‌سازی دارای ماژولی به نام Plume3D می‌باشد که می تواند رهاسازی نفت از بستر دریا را به‌خوبی مدل کند. در این نرم افزار از مدل لاگرانژی برای شبیه سازی حرکت نفت در نشتی‌های زیر سطح استفاده شده است [۲۳] و یکی از کاملترین و پیشرفته ترین مدلهای شبیه سازی نشت نفت از بستر دریا است که توسط SINTEF با داده های بدست آمده از آزمایش میدانی DeepSpill صحت سنجی شده است[۲۴]

این مدل بر اساس شار شناوری مخلوط نفت و گاز با محاسبه پارامترهای تلاطمی ناشی از سرعت فاز ترکیبی، دبی درون آمیختگی آب دریا در پلوم را محاسبه می کند. به همین منظور با محاسبه پارامترهای تلاطمی پیچک‌ها ، مقدار محاسبه شده درون آمیختگی سیال محیط به داخل پلوم را اعمال می کند که در نتیجه آن پهنای پلوم با فاصله از منبع افزایش یافته و شار شناوری آن کاهش می یابد. مدل *OSCAR* جریان پلوم نفت، گاز و آب دریای وارد شده به پلوم را به صورت لاگرانژی تا زمان رسیدن آلودگی به سطح دریا پیش بینی می نماید. از دیگر پارامترهای تلاطمی اعمال شونده در محاسبات عددی دینامیک حرکت پلوم، اثر آمیختگی در لایه بستر دریا[۷] و نیز انحراف محور پلوم و افزایش درون آمیختگی تلاطمی تحت تاثیر اختلاط واداشته ناشی از جریان آب دریا می باشد. در این مدل همچنین تاثیر پیچکهای ایجاد شده ناشی از جریان بالارونده پلوم در ایجاد نیروی پایین کشنده و بالابرنده[۸] رسوب، ذرات ریز نفت و حبابهای کوچک در ستون آب در نظر گرفته می شود.

در مدلسازی های عددی این تحقیق جریان آب دریا اندک و قابل اغماض فرض شده است لذا تاثیر پارامترهای تلاطمی واداشته ناشی از جریان آب دریا بر نتایج مدل قابل اغماض است در حالیکه پارامترهای تلاطمی ناشی از پیچک های ایجاد شده تحت تاثیر شار شناوری پلوم بر رفتار دینامیکی آن تاثیر گذارند. معهذا کلیه مدلهای تلاطمی معرفی شده نرم افزار در انجام مدلسازی ها فعال بوده اند.

سوکولفسکی و همکاران [۱۲] تاثیر پارامترهای جریانات اقیانوسی را بر دینامیک حرکت پلوم به دو دسته ۱) جریانات خالص اقیانوسی و ۲) تاثیر غالب لایه بندی چگالی در حضور جریانات ضعیف اقیانوسی ارائه کردند. سوکولفسکی و همکاران [۱۲] رابطه تجربی (۷) را جهت تعیین ارتفاع[۹] (h_s) در پلومهای دسته اول فوق الذکر که در آن آلاینده (قطرات درشت نفت یا حبابهای بزرگ گاز) تحت تاثیر سرعت جریان اقیانوسی (U) از پلوم آب درون آمیخته تفکیک می شوند معرفی کردند. آنها همچنین روابط تجربی (۸) و (۹) در خصوص ارتفاع بیشینه نفوذ پلوم و ارتفاع حبس پلوم فروریخته در ارتفاع شناوری خنثای پلومهای دسته دوم را به شکل زیر ارائه نمودند.

$$h_s = 5.1\ \frac{F_0}{(Uu_s^{2.4})^{0.88}} \qquad (۷)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]

$$h_p = 5.2\exp[-\left(\frac{u_s}{(F_0N)^{\frac{1}{4}}}-1.8\right)^2 \Big/ 10.1]\left(\frac{F_0}{N^3}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (۸)$$

$$h_T = 2.9\exp[-\left(\frac{u_s}{(BN)^{\frac{1}{4}}}-1.0\right)^2 \Big/ 27.0]\left(\frac{B}{N^3}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (۹)$$

در این تحقیق مدل‌سازی ها در محلی فرضی در دریای عمان با لایه‌بندی‌های مختلف عمق و شوری مطابق با مشخصات آزمایش های بعمل آمده در مراحل مختلف تعریف گردیدند. به همین منظور ابتدا اندازه نازل و دبی خروجی متناظر با محیط دریایی با احتساب عمق و لایه‌بندی مورد نظر تعیین شد. به منظور تطبیق تکانه اولیه مدل های عددی با تکانه اولیه آزمایشها و تعمیم شرایط آزمایش به محیط دریایی با ضریب ۱۰۰ برابر، مقادیر دبی و اندازه دهانه محل نشت آلاینده از بستر دریا محاسبه و اعمال شد. در مراحل مختلف مدل‌سازی، فرکانسهای شناوری مختلف محیط در این مجموعه مدلسازی های عددی اعمال گردیده و مقایسه و تحلیل شدند. مشخصه های دینامیکی مدلسازی های عددی انجام شده در جدول شماره ۳ ارائه شده است و تغییرات ابعادی پلوم در حالتهای مختلف مدلسازی های عددی در شکل ۷ نمایش داده شده اند.

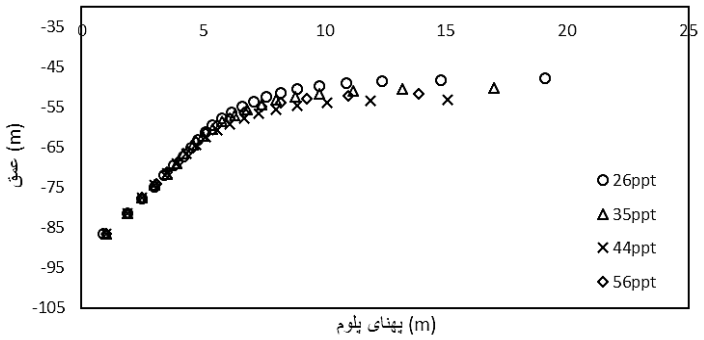
۵ - تحلیل نتایج آزمایشگاهی و عددی

با رسم حالت بی بعد پلوم ها مطابق آنچه که در شکل ۸ نمایش داده شده است می بینیم که با وجود اینکه پلومها در روند رشد و ارتفاع نفوذ آنها در محیط های با فرکانس های شناوری مختلف با یکدیگر تفاوت دارند (اشکال ۶ و ۷) ، لیکن در حالت بی بعد شده روند رشد و ارتفاع نفوذ بی بعد شده پلومها مشابه یکدیگر و تقریبا یکسان است(شکل ۸). در آزمایشهای بعمل آمده در محیط های با فرکانسهای شناوری مختلف، بیشینه ارتفاع نفوذ بی بعد شده‌ی پلومها دارای خطای استاندارد میانگین برابر ۰/۰۲۶۴ و انحراف استاندارد ۰/۰۵۲۸ می باشد. با توجه به اشکال ۶ و ۷ و ۸ و روابط (۲) تا (۵) نتیجه می گیریم که دینامیک حرکت و روند رشد پلوم واداشته نفتی در محیط دریایی تابعی از فرکانس شناوری محیط و شار شناوری پلوم آلاینده می باشد.

نشت واداشته آلاینده از بستر دریا در سه مرحله (فاز) در ستون آب رشد می کنند. فاز جت که در آن تکانه اولیه نشت بر نیروی شناوری پلوم غالب بوده وحرکت پلوم ناشی از تکانه اولیه در دهانه منشاء پلوم است، پس ازاین مرحله تکانه اولیه به مرور تحلیل می رود و فاز شناوری پلوم آلاینده آغاز می شود که در آن نیروی پیش برنده غالب، نیروی شناوری است. پس از تحلیل رفتن نیروی شناوری در ارتفاع نفوذ، فاز پخش و فرارفت آغاز می گردد و ذرات تحت تاثیر نیروی شناوری خود به حرکت ادامه می دهند. بنابراین می توان مراحل مذکور را با عناوین مرحله جت، مرحله پلوم و مرحله پخش و فرارفت نامگذاری کرد.

جدول ۳- مشخصه های جریان منشاء پلوم آلاینده و لایه بندی محیط استفاده شده در مدلسازی عددی

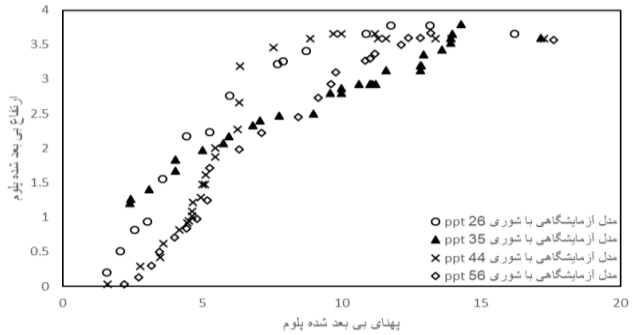
شماره مدل‌سازی	دبی (m^3/s)	سرعت اولیه در دهانه نازل (m/s)	شوری لایه زیرینppt	فرکانس شناوری محیط s^{-1}
۱	۴/۱۵	۴/۸	۲۶	۰/۰۳۴۱
۲	۴/۱۵	۴/۸	۳۵	۰/۰۳۹۲
۳	۴/۱۵	۴/۸	۴۴	۰/۰۴۶۱
۴	۴/۱۵	۴/۸	۵۶	۰/۰۴۸۵



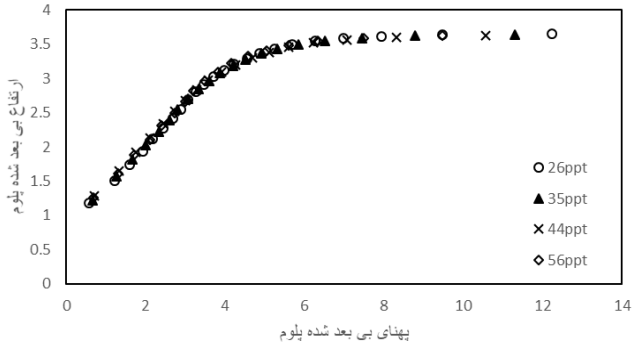
شکل ۷- نمیرخ پهنای پلوم به ارتفاع پلوم در نتایج روش عددی - پلوم تکفاز مایع در حوضچه های لایه‌بندی شده پایدار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]



الف



ب

شکل ۸- نمیرخ پهنای بی بعد شده پلوم به ارتفاع بی بعد شده پلوم. نتایج روش عددی (الف) و روش آزمایشگاهی (ب)

ارتفاع نفوذ پلوم در محیط لایه بندی شده توسط روابط (۱) و (۶) که تابعی از فرکانس شناوری محیط، شار شناوری پلوم آلاینده و سرعت لغزش قطرات و حبابها است محاسبه می شود. در شکل ۹ مقادیر بدست آمده از ارتفاع نفوذ پلوم ها در محیط آزمایشگاهی و نیز روش عددی با مقادیر بدست آمده از روابط (۱) و (۶) مقایسه شده اند. از آنجاییکه پلومهای آلاینده در این آزمایشها تکفاز مایع می باشند می توان گفت $u_s = 0$ و در نتیجه بیشینه ارتفاع نفوذ پلوم بدست آمده از رابطه (۶) برابر با بیشینه ارتفاع نفوذ بدست آمده از رابطه (۱) می باشد. همانطور که نشان داده شده است، در محیط آزمایشگاهی بدلیل قابل توجه بودن تکانه اولیه پلوم و در نتیجه قابل توجه بودن ارتفاع ناحیه جت (تقریبا ۱۶ سانتیمتر)، پلوم ها تا ارتفاعی بیشتر از مقادیر بدست آمده از روابط (۱) و (۶) نفوذ می کنند که این امر را می توان با قابل توجه بودن نسبت سرعت اولیه پلوم به ارتفاع محیط آزمایش توجیه کرد. این در حالی است که بدلیل ناچیز بودن نسبت سرعت اولیه پلوم به عمق دریا در روش عددی، نتایج بدست آمده از این روش ارتفاع نفوذ کمتری را نسبت به ارتفاع پیش بینی شده توسط روابط (۱) و (۶) نشان می دهند. ملاحظه می شود که نرخ تغییر در ارتفاع نفوذ پلومهای دارای شار شناوری های یکسان، با افزایش فرکانس شناوری محیط در هر دو روش آزمایشگاهی و عددی و نیز مقادیر بدست آمده از روابط (۱) و (۶) روند یکسانی را طی می کنند.

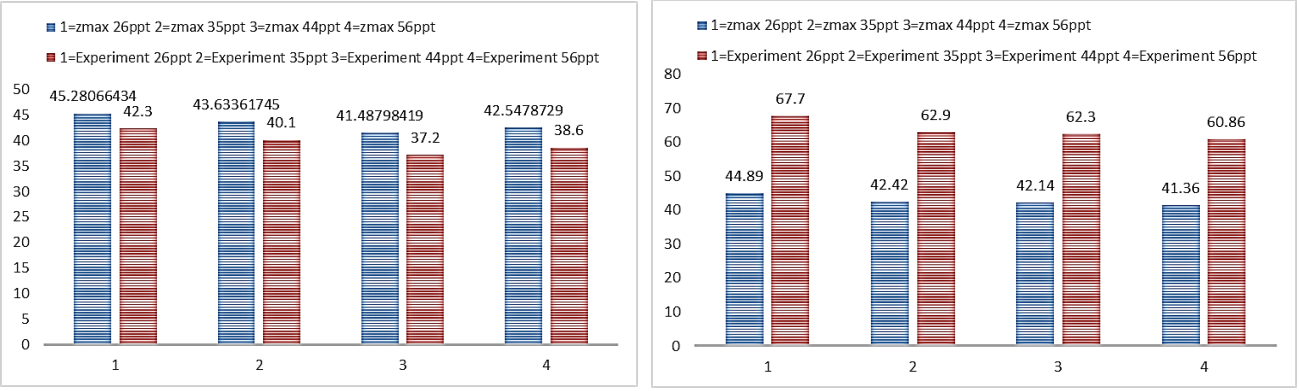
۶ - نتیجه گیری

نشت نفت از بستر دریا و پلوم ناشی از آن رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهد. این رفتارهای دینامیکی تابع شرایط فیزیکی حاکم از طرف خصوصیات سیال آلاینده، محل و شرایط هندسی دهانه بازشو و شرایط دینامیکی و استاتیکی محیط دریایی هستند و این سه را می توان بعنوان عوامل اصلی تعیین کننده رفتار پلوم در نظر گرفت. تغییر در خصوصیات فیزیکی نفت همچون چگالی، گرانروی، کشش سطحی ذرات نفت، فشار و دمای اولیه مخزن و نیز تغییر در ترکیبات اصلی نفت به عنوان خصوصیات سیال آلاینده باعث تغییر در شار شناوری و نیروهای تعیین کننده دینامیک حرکت پلوم می شوند. همچنین ابعاد خط لوله حامل نفت، زبری داخلی لوله، قطر خط لوله و نوع و هندسه دهانه بازشو همگی از عوامل تعیین کننده دبی و تکانه اولیه پلوم آلاینده می باشند. ازطرفی شرایط دینامیکی و استاتیکی محیط دریایی همچون عمق محل نشستی، جریان‌های درونی دریا و لایه‌بندی در محیط دریایی تعیین کننده رفتار دینامیکی آلاینده در ستون آب می باشند. همگی عوامل فوق و بسیاری از عومل دیگر می توانند تاثیر مستقیمی بر ارتفاع، پهنا و سرعت بالا روی پلوم بگذارند و در نهایت محل، زمان به سطح رسیدن و گستره آلودگی بر سطح دریا را تعیین کنند.

در محیط واقعی دریا احتمال وقوع لایه بندی پایدار چگالی محدود است و جریانات دریایی ولو ضعیف، پدیده غالب محسوب می شوند. مقایسه روابط (۶) و (۸) نشان می دهد وجود اندک لایه‌بندی در محیط دریایی که معمولاً در اثر تغییر دما و شوری با تغییر عمق رخ می دهد، باعث می‌شود که رشد عمودی پلوم آلاینده محدود شده و در نهایت در یک ارتفاع قابل محاسبه، نفوذ پلوم متوقف شود. روابط تجربی (۱)، (۶) و (۸) نشان می دهند که بیشینه ارتفاع نفوذ پلوم در هر دو محیط دارای پایداری چگالی خالص و پایداری چگالی غالب بر جریانات ضعیف اقیانوسی، تابعی از فرکانس شناوری محیط، شار شناوری آلاینده و سرعت لغزش قطرات نفت می باشد. پارامترهای تاثیر گذار بر ارتفاع نفوذ پلوم در روابط (۶) و (۸) نشان می دهند که نتایج این تحقیق در صورت وجود اثرات تلاطمی جریانات ضعیف اقیانوسی کماکان کاربردی هستند. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شد با افزایش فرکانس شناوری محیط، ارتفاع رشد پلوم کاهش می‌یابد. دلیل این تغییر رفتار در پلوم را می‌توان در کاهش شار شناوری پلوم در حین حرکت به سمت بالا یافت.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]



الف ب

شکل ۹- مقایسه ارتفاع نفوذ از روش محاسباتی با ارتفاع نفوذ بدست آمده از روش عددی (الف) و روش آزمایشگاهی (ب)

با افزایش شوری بستر دریا و افزایشی فرکانس شناوری محیط و متاثر از اختلاط پلوم با آب شور سنگین‌تر لایه های زیرین، پلوم متناسب با رشد خود چگال‌تر شده و شار شناوری آن کاهش می یابد تا در نهایت شار شناوری پلوم در سطح شناوری خنثی به صفر می‌رسد لیکن مشاهده شد بدلیل اینکه تکانه پلوم هنوز به صفر نرسیده است، پلوم ابتدا تا ارتفاعی مضاعف رشد می‌کند و سپس فرو می ریزد و اندکی نشست می کند. در تمامی آزمایش‌های بعمل آمده بر پلوم‌های تکفاز مایع، رشد مضاعف ارتفاع پلوم و فروریختن قله پلوم به وضوح قابل مشاهده بود و نتایج کلیه مدل های عددی نیز تغییر جهت بردار سرعت در ارتفاع نفوذ از مثبت به منفی را نشان می دادند.

متوقف شدن نفوذ پلوم بدین معناست که در بیشینه ارتفاع نفوذ مشخصه‌های دینامیکی پلوم که در اثر کاهش شار شناوری متناسب با افزایش ارتفاع پلوم، در حال کاهش بوده است از بین می رود و پس از آن نیروی شناوری هر یک از قطرات به صورت مجزا باعث صعود آن‌ها به سمت سطح آب می‌شود. این ارتفاع محلی است که فاز حرکت دینامیکی پلوم به فاز حرکت فرارفت و پخش ذرات آلاینده تبدیل می‌شود.

نتایج این مطالعه در بررسی پلومهای نفتی زیر سطحی در خلیج فارس می تواند به کار برده شود.

۷ - تشکر و قدردانی

نویسندگان بدینوسیله مراتب قدردانی خود را از سازمان SINTEF که با در اختیار قراردادن مدل MEMW و ماژولهای OSCAR و GASTRACK موجبات انجام این پژوهش را فراهم آوردند، خانم اندرسون که هماهنگی های لازم جهت تامین لایسنس های مورد نیاز را بعمل آوردند و آقایان نادر باغبان، محمد عباسیان صالحی، محسن فارسی و علیمراد موسوی اول که در فراهم آوردن امکانات مراحل آزمایشگاهی این تحقیق نقش بسزایی داشتنه اند اعلام می دارند.

کلید واژگان

1 - ERP
2 - Contingency planning
3 - SPH
4 - Slip Velocity
5 - Peeling height
6 - Stable
7 - Benthic mixing
8 - Sediment Resuspension Model
9 - Separation height

۸ – مراجع

1. Thibodeaux Louis J., Kalliat T. Valsaraj, Vijay T. John, Kyriakos D. Papadopoulos, Lawrence R. Pratt and Noshir S. Pesika, (2010), *Marine oil fate: Knowledge gaps, Basic research and development needs; A perspective based on the Deepwater Horizon Spill*, Environmental Engineering Science, Vol.28, pp 87-93.

2. McNutt Marcia K., Rich Camillib, Timothy J. Cronec, George D. Guthried, Paul A. Hsiehe, Thomas B. Ryersonf, Omer Savasg, and Frank Shafferd, (2012), *Review of flow rate estimates of the Deepwater Horizon oil spill*, PNAS, Vol. 109, No. 50, pp 20260–20267.

3. Alibeigi A.A., Morovvati H., Lari K., (2014) *Field study of slurry dispersion in offshore drilling*, Islamic Azad University Tehran North Branch (In Persian).

4. Ranjbar P. and Shafiei Far M., (2011), *Numerical simulation of accidental oil blowout, dispersion and surfacing; Case study of Khark Island oil transport pipe line*, Trabiat modarres university, Tehran. (In Persian).

5. Rezvan Doost J., Shafiei Far M., Karbasi A.R., (2012), *Numerical simulation if oil blowout from offshore rigs; Case study of Iranian oil fields in Persian Gulf*, Trabiat modarres university, Tehran. (In Persian).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]

6. Yousefi Azar DolatAbadi F. and Shafie Far M., (2017) *Numerical Simulation of shallow water oil blowout*, Trabiat Modarres University, Tehran. (In Persian).

7. Abd Maaboodi A., Shafiei Far M., Valizadeh A.R., (2012), *Numerical simulation of underwater oil leakage and surfacing in SPH method*, Trabiat Modarres University, Tehran. (In Persian).

8. Ghadiri Masoom M. and Malmasi S., (2014) *Ecological Risk Analysis of Oil pollution*, Islamic Azad University Tehran North Branch (In Persian).

9. Yousefi Siahkalroudi S., Malmasi S., Nezakati R., (2016), *Effectivity analysis of oil spill control and pollution management; Case study in Persian Gulf*, Islamic Azad University Tehran North Branch (In Persian).

10. Socolofsky A.A. and Adams A.A, (2002), *Multi-phase plumes in uniform and stratified crossflow*, Journal of hydraulic research. vol. 40, No. 6, pp 661-672.

11. Socolofsky A.A. and Adams A.A, (2005), *Role of Slip Velocity in the Behavior of Stratified Multiphase Plumes*, Journal of hydraulic engineering. vol. 131, No. 4, pp 273-282.

12. Socolofsky A.A., Adams A.A. and Sherwood C.R., (2011), *Formation dynamics of subsurface hydrocarbon intrusion following the Deepwater Horizon blowout*, Geophysical Research Letter, pp 1-6.

13. Lima Neto, Iran E., Zhao David Z., Rajarantam Nallamuthu, (2008), *Bubbly jets in stagnant waters*, International Journal of multiphase flow, 34, pp 1130-1141.

14. Zhao Lin, Boufadel M. C., Adams E., Socolofsky S.A., King T., Lee K. and Nedwed T., (2015), *Simulation of scenarios of oil droplet formation from the Deepwater Horizon*, Marine Pollution Bulletin, 101, pp 304-319.

15. Zheng Li, Poojitha D. Yapa and Fanghui Chen, (2002), *A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – Part I: Theory and model formulation*, Journal of Hydraulic Research Vol. 41 No.4, pp 339-351.

16. Lalith K. Dasanayaka and Poojitha D. Yapa, (2009), *Role of plume dynamics phase in a deep water oil and gas release model*, Journal of Hydro-environment Research Vol.2, pp 243-253.

17. Aliakbari Bidokhti, Abbasali, (2018), *Fundamentals of fluid dynamics*, University of Tehran, Tehran (In Persian).

18. Turner J.S., 1973, *Buoyancy effects in fluids*, Cambridge University Press, Cambridge.

19. Hassanzadeh Jobehdar Mona, *Experimental study of two phase flow in a liquid Cross-Flow and effervescent atomizer*, the University of Western Ontario, (2014), 180.

20. Chen J.J.J, M.Jamialahmadi and S. M. Li, (1989), *Effect of liquid depth on circulation in bubble column: a visual study*, Chemical Engineering research and design, Vol. 67, pp 203-207.

21. Delnoij E., J.A.M. Kuipers and W. P. M. van Swaaij, (1997), *Dynamic simulation of gas-liquid two-phase flow: effect of column aspect ratio on the flow structure*, Chemical Engineering Science, Vol. 52, No. 21:22, pp 3579-3772.

22. Seol D.G. Bryant D.B. and Socolofsky S.A., (2009), *Measurement of Behavioral Properties of entrained Ambient Water in a Stratified Bubble Plume*, Journal of hydraulic engineering. Vol. 135, No. 11, pp 983-988.

23. Johansen Oistein, *DeepBlow - a Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts*, Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 6, No. 2, (2000), pp 103-111.

24. SINTEF MEMW (Marine Environmental Modeling Workbench), (2016), *User's Manual for OSCAR and DREAM*, SINTEF Ocean Environmental Technology, Version 8.0.1, Trondheim, Norway.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.15.3]