

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

بهروز بافنده<sup>۱</sup>، عباسعلی علی اکبری بیدختی<sup>۲\*</sup>، کامران لاری<sup>۳</sup>، مجتبی عظام<sup>۴</sup>

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

<sup>۲</sup> استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ bidokhti@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال؛ k\_lari@iau-tnb.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ ezam@srbiau.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

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 تأثیرات تغییر در پایداری استاتیکی 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 بی بعد تبدیل گردید. مشاهده شد که کاهش پایداری استاتیکی آب دریا باعث افزایش ارتفاع نفوذ و کاهش پهنای پلوم آلاینده می شود. 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.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

کلمات کلیدی:

مکانیک سیالات

ارتفاع حبس پلوم

آلودگی

چینه بندی

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

Behrooz bafandeh<sup>1</sup>, Abbasali Aliakbari Bidokhti<sup>2\*</sup>, Kamran Lari<sup>3</sup>, Mojtaba Ezam<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran; bidokhti@ut.ac.ir

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Physical Oceanography, North Tehran Branch, Islamic Azad University; k\_lari@iau-tnb.ac.ir

<sup>4</sup> 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.

سکوهای حفاری و بهره‌برداری فراساحل در دهه‌های گذشته بطور گسترده‌ای در جهان افزایش یافته‌اند. با وجود پیشرفتهای چشم‌گیر در تکنولوژی سکوهای حفاری و بهره‌برداری نفتی، این قبیل فعالیتها همیشه در معرض تهدید خطرات و حوادثی بوده‌اند که می‌توانند به فجایع زیست محیطی منجر شوند. عمق دریا، شرایط محیطی و فشار کاری در این سکوها به نحوی است که نشئت نفت می‌تواند تاثیرات جبران‌ناپذیری بر محیط زیست دریایی و سواحل مجاور حوضه‌های نفتی گذارد. یکی از مهمترین حوادث دریایی از این دست، حادثه Deepwater Horizon سال ۲۰۱۰ در خلیج مکزیک است که منجر به نشئت 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<sup>۱</sup> و طرح عملیات احتمالی<sup>۲</sup> 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 نشئت‌های زیر آبی و الگوی حرکت آلاینده‌ها در آب دریا، کماکان دانش مکانیک سیالات برای پیش‌بینی نشئت‌های نفت و گاز از بستر دریا محدود است.

علی بیگی و همکاران [۳] نحوه پخش سیالات حفاری حوزه نفتی را بصورت میدانی مطالعه کردند و رنجبر و شفيعی 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 چاه‌های فراساحل در حوضه نفتی خلیج فارس را با مدل OSCAR به روش عددی شبیه‌سازی کردند و یوسفی آذر دولت آبادی و شفيعی فر [۶] با استفاده از مدل OSCAR تاثیر اضافه شدن گاز به نفت آلاینده در نشئت اتفاقی از بستر خلیج فارس را مورد بررسی قرار دادند. عبد معبودی و همکاران [۷] جهت مدلسازی عددی نشئت نفت از بستر دریا از روش هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>۳</sup> استفاده کردند و با استفاده از آن روش مسیر حرکت لکه نفتی در ستون آب را مطالعه کردند. از طرفی قدیری معصوم و ملامسی [۸] تاثیرات اکولوژیکی ناشی از ریزش نفت در خلیج فارس را بررسی کردند و یوسفی سياهکلرودی و همکاران [۹] اثر بخشی اقدامات کنترل و مدیریت آلاینده‌ها در حوادث نشئت 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 نشئت از بستر را مطالعه

کرده و روابطی تجربی جهت پیش‌بینی 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 قطرات نفت را بر دینامیک حرکت پلوم مطالعه کردند و روابط تجربی جهت پیش‌بینی اندازه ذرات ارائه کردند.

از جمله عوامل تاثیرگذار در پیش‌بینی رفتار پلوم آلاینده ناشی از نشئت نفت از بستر دریا وجود چینه‌بندی آب در دریا است. تغییر در چینه‌بندی آب می‌تواند کاهنده و یا افزایشده سرعت حرکت پلومهای نفتی و تعیین 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 می‌تواند لایه‌بندی دما - شوری داشته باشد و از طرفی این لایه‌بندی معمولاً ثابت و پایدار نیست، لذا در شرایط مختلف لایه بندی آب دریا، ارتفاع و زمان توقف نفوذ پلوم نفتی متغیر خواهد 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 مشخصه‌های مختلف نقطه گذار می‌توانند 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 آلودگی‌های نفتی می‌تواند

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<sup>۴</sup> 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 فازي پیش از فروریختن<sup>۵</sup> ( $h_p$ ) آن دانسته و عدد بی بعد سرعت مشخصه  $U_N = u_s / (F_0 N)^{1/4}$  را تعیین کننده رفتار دینامیکی پلوم معرفی کردند. آنها همچنین رابطه (۶) را جهت تعیین ارتفاع نفوذ پلوم معرفی کردند [۱۱].

$$h_p = 5.2 \exp\left[-\left(\frac{u_s}{(F_0 N)^{1/4}} - 1.8\right)^2 / 3.2^2\right] \left(\frac{F_0}{N^3}\right)^{1/4} \quad (6)$$

در این روابط  $\rho_a$  چگالی محیط،  $\rho_0$  چگالی سیال پلوم و  $\rho_r$  یک چگالی مرجع می باشد.

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

در این تحقیق ظرف شفاف با ابعاد  $45 \times 45 \times 120$  سانتیمتر از جنس پلکسی گلاس ساخته شد تا درون آن لایه بندی محیط آزمایش به صورت لایه بندی شوری آب با فرکانس های شناوری مختلف ایجاد شود. جهت ایجاد لایه بندی 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  $10 \times 10 \times 40$  سانتیمتر می توانست 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 به وسیله چسب شلنگ درون آن نصب گردد. هدف از این کار توزیع یکنواخت آب ورودی به مخزن از طریق اسفنج شناور بوده تا

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 پیچک های بزرگ و فرایند اختلاط مشخص می شود. پیچک های بزرگ باعث درون آمیختگی سیال محیط به داخل پلوم و اختلاط کوچک مقیاس سبب درهم آمیختگی در مرز این پیچک ها 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 لایه بندی شده دارای پایداری ( $N \neq 0$ ) حرکت کند، سرعت بالاروی پلوم روند کاهشی خود را ادامه می دهد تا نهایتاً در ارتفاعی قابل محاسبه رشد عمودی پلوم متوقف می شود و سرعت بالاروی آن به صفر میرسد. بیشینه مقداری که پلوم در جهت قائم رشد می کند تقریباً معادل است با [۱۸]:

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

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

$$Z = 0.41 \alpha^{-1/2} F_0^{1/4} N^{-3/4} Z_1 \quad (2)$$

$$b = 0.82 \alpha^{1/2} F_0^{1/4} N^{-3/4} b_1 \quad (3)$$

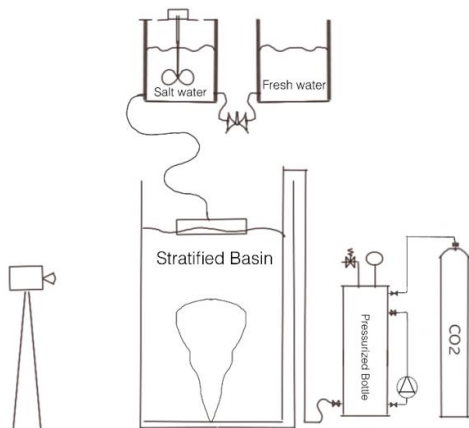
$$w = 1.158 \alpha^{-1/2} F_0^{1/4} N^{1/4} w_1 \quad (4)$$

$$g' = 0.819 \alpha^{-1/2} F_0^{1/4} N^{5/4} g'_1 \quad (5)$$

که اندیسهای (۱) معرف پارامترها در چشمه هستند و  $F_0 = g'Q$  و  $N^2 = [-g/\rho_r(\partial\rho_a/\partial z)]$ ،  $Q$  دبی حجمی چشمه،  $\rho_a$  چگالی محیط،  $\rho_r$  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  $v$  گرانشی شماره پلوم است و عدد فرود آن  $Fr = w/Nb$  است. در این تحقیق

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 می کرد. شکل ۱ چیدمان تجهیزات آزمایش را نمایش می دهد.

با در نظر 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 میلی متر را به عنوان فاصله ای از نازل که در آن خصوصیات جریان پلوم به صورت پایدار<sup>۶</sup> 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 لایه بندی 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

از ایجاد اغتشاش و بهم آمیختگی محتویات مخزن شفاف جلوگیری شود.

برای ایجاد لایه بندی هر دو ظرف آب شور و شیرین نصب شده در ارتفاع ابتدا به میزان ۱۵۰ لیتر با آب شیرین، آب گیری می شدند. مجموع آب درون این مخازن تقریباً ۱۰۰ لیتر بیشتر از ظرفیت آب مورد نیاز در ظرف شفاف در نظر گرفته شد تا از عملکرد بی نقص همزن در طول لایه بندی محیط اطمینان حاصل گردد. پس از تکمیل آب گیری مخازن، محتویات مخزن آب شور با اضافه کردن مقادیر مورد نظر نمک دریایی و بهم زدن پیوسته و سریع توسط همزن برقی تا اندازه های مختلف مورد نیاز هر مرحله از آزمایش شور می گردید. در این روش لایه بندی، 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 می گردید و با بالا آمدن سطح آب در مخزن شفاف اسفنج شناور شده و بالا می آید. 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 می شود و با توجه به عملکرد پیوسته همزن نصب شده در مخزن آب شور، باعث کاهش شوری آب در مخزن آب شور می گردد. 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 لوله ای مسی به قطر ۶/۳۵ میلی متر 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 می آمد. لوله مسی قطر کف مخزن را طی کرده و مجدداً 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 میلی متر در لوله مسی و دقیقاً به صورت عمودی رو به بالا ایجاد گردید. شعاع خم هر کدام از زانوهای ایجاد شده در مسیر لوله مسی ۵ سانتی متر 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 دی اکسید کربن تامین شده توسط یک کپسول تحت فشار و کنترل شده توسط دو رگلاتور بر سطح مایع درون مخزن، فشار خروجی آن را ثابت نگهداری می کرد. حفظ فشار ثابت استاتیک بر سطح سیال باعث تامین و ثبات تکانه اولیه پلوم در طول آزمایش می گردد. این امر با استفاده از دو رگلاتور فشار استفاده شده در کپسول آزمایش میسر گردید که یکی از آن ها

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 لایه بندی شده نشان می دهد که رفتار پلوم در محیط لایه بندی شده تابعی از فرکانس شناوری محیط است.

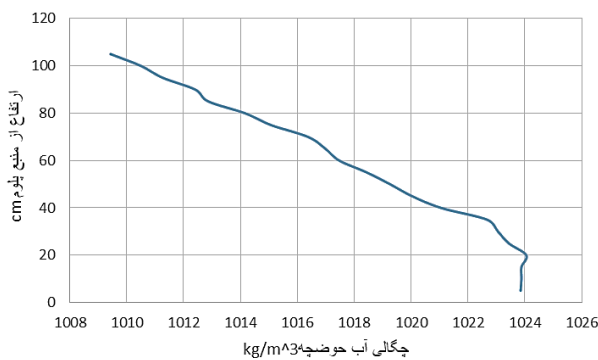
$2 M_0^{0.75} / F_0^{0.5}$  معرفی شده و در این سری آزمایشها بین  $16/2$  و  $16$  سانتیمتر است نزدیک و البته کمتر از آن باشد. در مشخصه ناحیه جت فوق الذکر  $M_0$  تکانه اولیه پلوم است. آزمایشهای بعمل آمده با سرعت شاتر تقریبی  $10$  فریم بر ثانیه ( $596$  fpm) تصویر برداری شد و تصاویر بر صفحه شبکه بندی شده با دقت  $2/5$  میلی متر مور مطالعه و بررسی قرار گرفتند. جدول

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

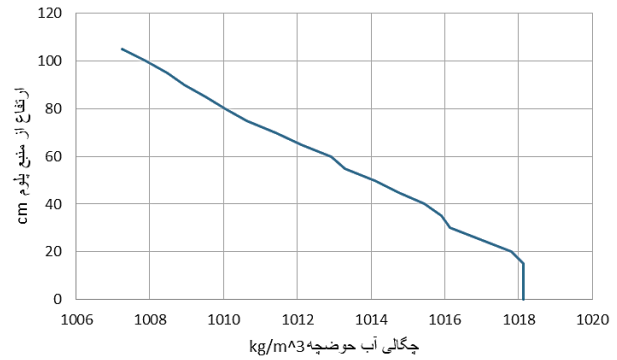
فشار مطلق (فشار مخزن+فشار جو) کیلوگرم بر سانتیمتر مربع	دبی (لیتر بر ثانیه)	سرعت اولیه (متر بر ثانیه)	افت فشارمطلق مسیر (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	عدد رینولدز در دهانه پلوم
۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۰/۹	۱۱۱۳۹/۶۳

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

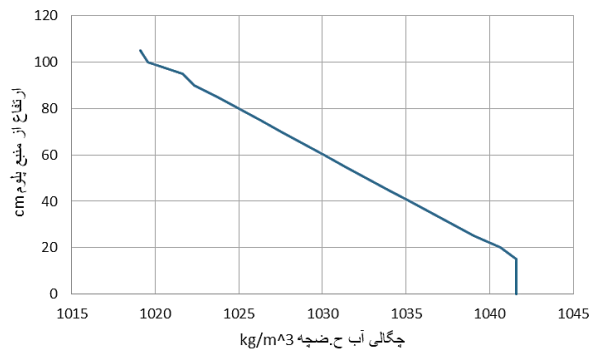
شماره آزمایش	فشار مطلق کپسول $\frac{kg}{cm^2}$	دبی ( $l/s$ )	سرعت اولیه در دهانه نازل (m/s)	شوری لایه زیرین ppt	دما $^{\circ}C$	فرکانس شناوری $s^{-1}$
۱	۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۲۶	۲۴/۵	۰/۳۲۸
۲	۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۳۵	۲۱/۴	۰/۳۹۲
۳	۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۴۴	۱۸/۲	۰/۴۳۶
۴	۲	۰/۰۴۲۹	۴/۴۷	۵۶	۱۸/۵	۰/۴۸۵



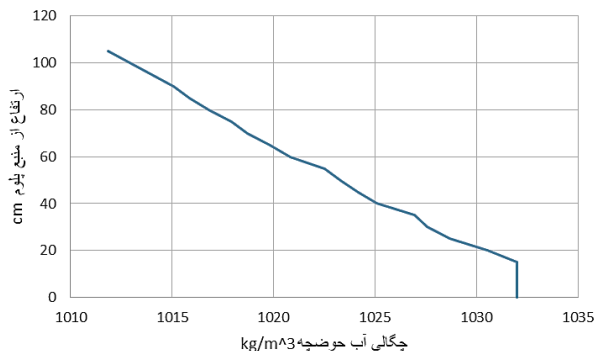
ب



الف



د

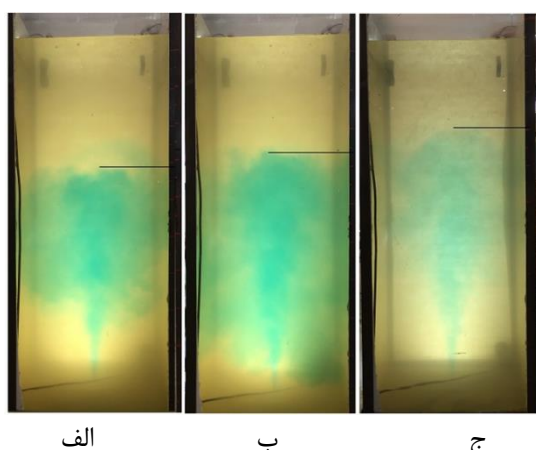


ج

شکل ۲- لایه بندی چگالی محیط در مطالعه آزمایشگاهی  $26$  ppt (الف)،  $35$  ppt (ب)،  $44$  ppt (ج) و  $56$  ppt (د) شوری اضافه بر واحد حجم در بستر حوضچه آزمایش

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 لایه بندی محیط بر رفتار دینامیکی پلوم آزمایش هایی با ثابت حفظ کردن مشخصات پلوم و سیال آلاینده در محیط هایی با لایه بندی های 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.

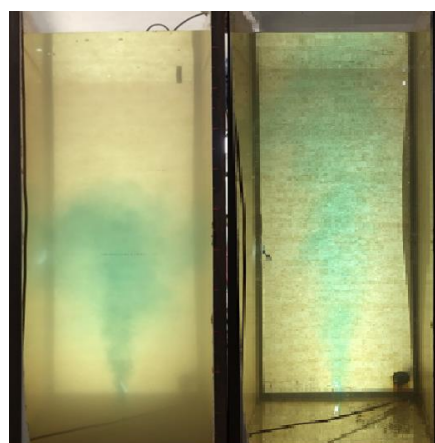


الف ب ج

شکل ۵ - افزایش ارتفاع نفوذ پلوم تکفاز مایع در محیط لایه بندی شده با کاهش فرکانس شناوری و شوری لایه زیرین. آزمایشهای شماره او ۳ و ۴ (الف ۵۶ppt) و (ب ۴۴ppt) و (ج ۲۶ppt) شوری اضافه بر واحد حجم در بستر حوضچه

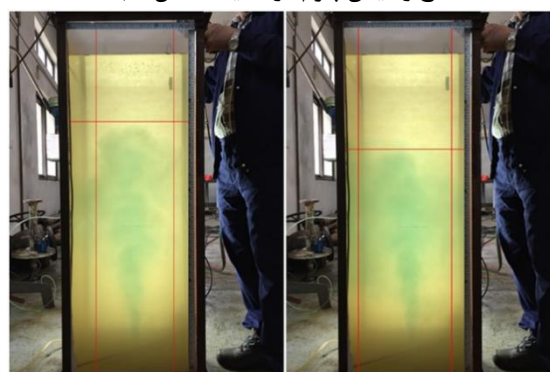
با فرض این که کلاهک پلوم بصورت گوسی رشد و حرکت می کند و بیشترین ارتفاع در هر تصویر مربوط به خط مرکزی پلوم است، ابعاد ثبت شده ی پلوم با روابط مثلثاتی تابع فاصله و زاویه لنز دوربین از

در شکل ۳ تفاوت رفتار پلوم در محیط لایه بندی شده و محیط همگن نمایش داده شده است. همانطور که از شکل ۳ بر می آید، وجود لایه بندی چگالی پایدار در محیط باعث می شود که رشد پلوم در ارتفاع مشخصی متوقف شود که این ارتفاع در اصطلاح ارتفاع نفوذ (فاصله از منبع پلوم) نامیده می شود. در بررسی تصاویر بدست آمده از دینامیک حرکت پلوم مشاهده شد که در این ارتفاع سرعت بالا روی پلوم به صفر می رسد و پس از آن اندکی بصورت منفی تغییر پیدا می کند. بدین معنی که قله پلوم پس از رسیدن به این ارتفاع بر روی پلوم بر می گردد و ارتفاع پلوم اندکی کاهش می یابد. 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 لایه بندی 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

DeepSpill SINTEF با داده های بدست آمده از آزمایش میدانی SINTF 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 پیچک ها، 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<sup>۷</sup> 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 بالارنده<sup>۸</sup> رسوب، ذرات ریز نفت و حبابهای کوچک در ستون آب در نظر گرفته می شود.

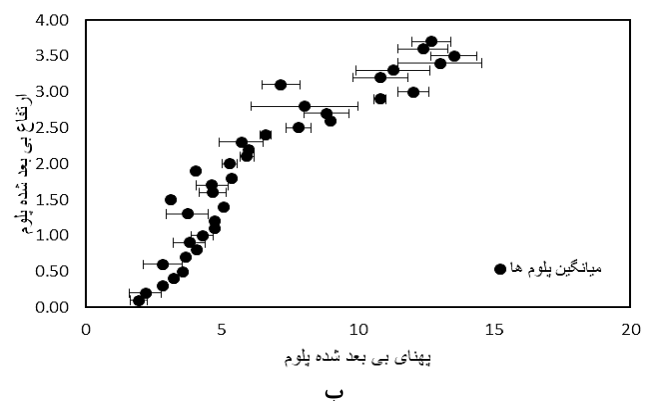
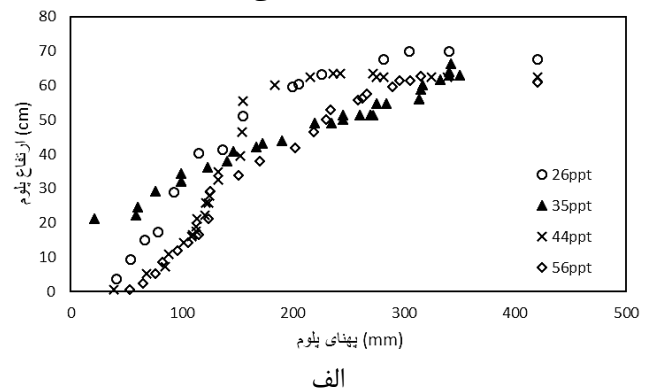
در مدلسازی های عددی این تحقیق جریان آب دریا اندک و قابل اغماض فرض شده است لذا تاثیر پارامترهای تلاطمی واداشته ناشی از جریان آب دریا بر نتایج مدل قابل اغماض است در حالیکه پارامترهای تلاطمی ناشی از پیچک های ایجاد شده تحت تاثیر شار شناوری پلوم بر رفتار دینامیکی آن تاثیر گذارند. معهدا کلیه مدل های تلاطمی 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<sup>۹</sup> ( $h_s$ ) 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.

$$h_s = 5.1 \frac{F_0}{(Uu_s^{2.4})^{0.88}} \quad (7)$$

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 خطهای 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 استاندارد ۴/۱۶۵ می باشد.



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 لایه بندی 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 لایه بندی محیط بر رفتار دینامیکی پلوم به روش مدلسازی از نرم افزار OSCAR از مجموعه MEMW سازمان نیروی SINTEF استفاده گردیده است. این نرم افزار مدلسازی دارای ماژولی به نام Plume3D می باشد که می تواند رها سازی نفت از بستر دریا را به خوبی مدل کند. در این نرم افزار از مدل لاگرانژی برای شبیه سازی حرکت نفت در نشتی های زیر سطح استفاده شده است [۲۳] و یکی از کاملترین و پیشرفته ترین مدل های شبیه سازی نشت نفت از بستر دریا است که توسط

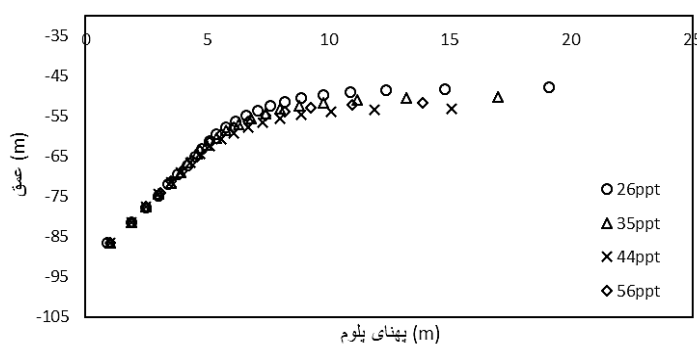
### ۵ - تحلیل نتایج آزمایشگاهی و عددی

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

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



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

$$h_p = 5.2 \exp\left[-\left(\frac{u_s}{(F_0 N)^{\frac{1}{4}}} - 1.8\right)^2 / 10.1\right] \left(\frac{F_0}{N^3}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

$$h_T = 2.9 \exp\left[-\left(\frac{u_s}{(BN)^{\frac{1}{4}}} - 1.0\right)^2 / 27.0\right] \left(\frac{B}{N^3}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

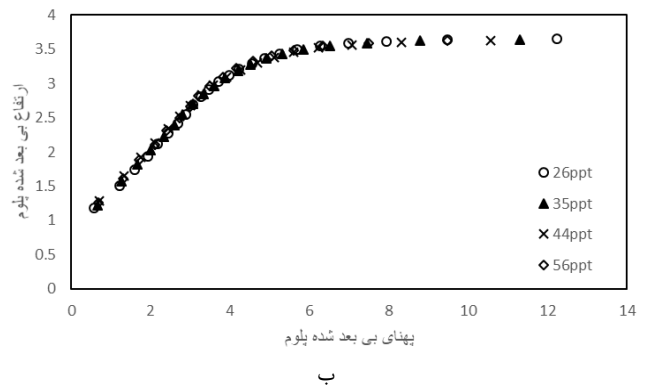
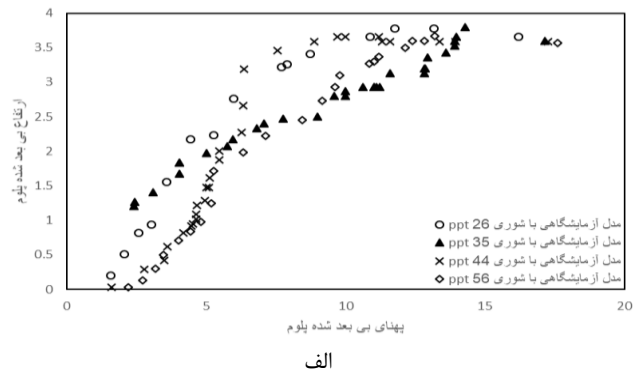
در این تحقیق مدل سازی ها در محلی فرضی در دریای عمان با لایه بندی های مختلف عمق و شوری مطابق با مشخصات آزمایش های بعمل آمده در مراحل مختلف تعریف گردیدند. به همین منظور ابتدا اندازه نازل و دبی خروجی متناظر با محیط دریایی با احتساب عمق و لایه بندی مورد نظر تعیین شد. به منظور تطبیق تکانه اولیه مدل های عددی 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 مدل سازی، 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 حالت های مختلف مدلسازی های عددی در شکل ۷ نمایش داده شده اند.

دو روش آزمایشگاهی و عددی و نیز مقادیر بدست آمده از روابط (۱) و (۶) روند یکسانی را طی می کنند.

### ۶ - نتیجه گیری

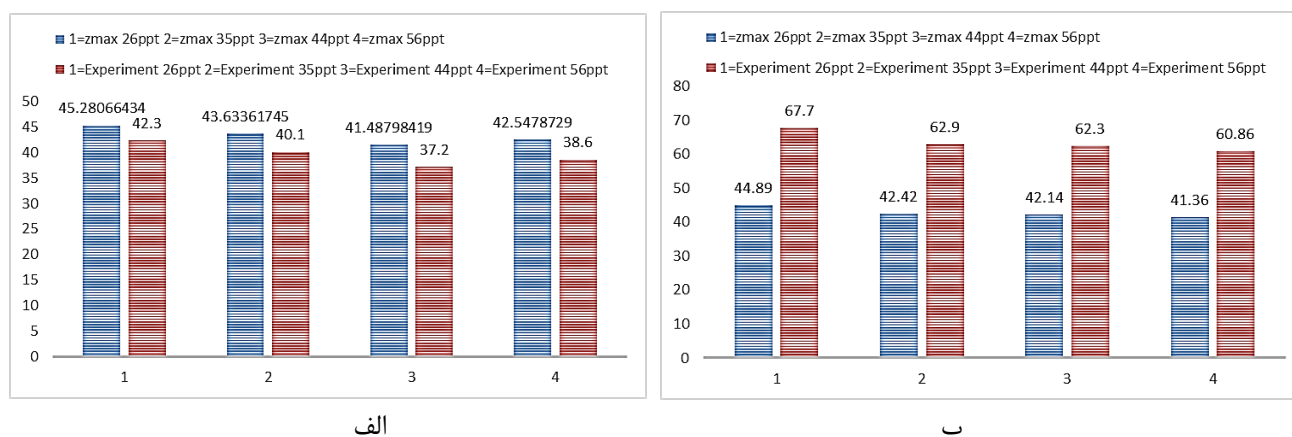
نشت نفت از بستر دریا و پلوم ناشی از آن رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهد. این رفتارهای دینامیکی تابع شرایط فیزیکی حاکم از طرف خصوصیات سیال آلاینده، محل و شرایط هندسی دهانه باز شو و شرایط دینامیکی و استاتیکی محیط دریایی هستند و این سه را می توان بعنوان عوامل اصلی تعیین کننده رفتار پلوم در نظر گرفت. 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 باز شو همگی از عوامل تعیین کننده دبی و تکانه اولیه پلوم آلاینده می باشند. از طرفی شرایط دینامیکی و استاتیکی محیط دریایی همچون عمق محل نشست، جریان های درونی دریا و لایه بندی در محیط دریایی تعیین کننده رفتار دینامیکی آلاینده در ستون آب می باشند. همگی عوامل فوق و بسیاری از عوامل 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 لایه بندی در محیط دریایی که معمولاً در اثر تغییر دما و شوری با تغییر عمق رخ می دهد، باعث می شود 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 می یابد. دلیل این تغییر رفتار در پلوم را می توان در کاهش شار شناوری پلوم در حین حرکت به سمت بالا یافت.



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 ( تقریباً 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



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

### 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*, Trabiati 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*, Trabiati modarres university, Tehran. (In Persian).

با افزایش شوری بستر دریا و افزایشی فرکانس شناوری محیط و متاثر از اختلاط پلوم با آب شور سنگین تر لایه های زیرین، پلوم متناسب با رشد خود چگال تر شده و شار شناوری آن کاهش می یابد تا در نهایت شار شناوری پلوم در سطح شناوری خنثی به صفر می رسد لیکن مشاهده شد بدلیل اینکه تکانه پلوم هنوز به صفر نرسیده است، پلوم ابتدا تا ارتفاعی مضاعف رشد می کند و سپس فرو می ریزد و اندکی نشست می کند. در تمامی آزمایش های بعمل آمده بر پلوم های 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 مشخصه های 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 می شود. این ارتفاع محلی است که فاز حرکت دینامیکی پلوم به فاز حرکت فرارفت و پخش ذرات آلاینده تبدیل می شود.

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 قرار دادن 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 داشته اند اعلام می دارند.

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.
6. Yousefi Azar DolatAbadi F. and Shafie Far M., (2017) *Numerical Simulation of shallow water oil blowout*, Trabiati 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*, Trabiati 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.