

تعیین ابعاد هندسی بهینه از منظر هیدرودینامیکی برای مخزن استوانه‌ای انبارش نفت در دریای خزر

محمد توکلی دخرآبادی¹، سید محمد حسین شریفی²، مهرداد اکبری³، ابراهیم امینی⁴

¹ دانشجوی دکتری، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ mohammad_tavakoli@mech.sharif.ir

² استادیار، دانشکده علوم دریایی محمودآباد، دانشگاه صنعت نفت؛ sharifi@put.ac.ir

³ کارشناس ارشد، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی شریف (شرکت نفت خزر)؛ akbari.mehrdad@gmail.com

⁴ کارشناس ارشد، مهندسی دریا، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ ebrahim.amini@gmail.com

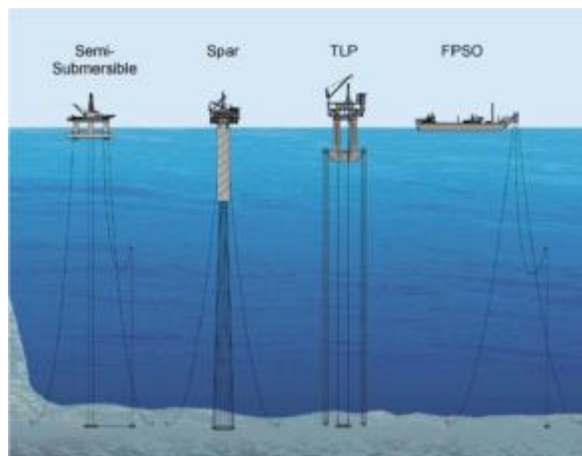
چکیده

شناورهای انبارش فرآورده‌های نفتی همواره به‌عنوان مهم‌ترین ادوات استخراج نفت از بستر دریا محسوب می‌گردند. استفاده از این سازه‌ها در کنار سکوهای استخراج، موجب می‌گردد تا همواره فرآیند استخراج صورت پذیرد و تا فرارسیدن شناورهای انتقال، نیاز به قطع این فرایند نباشد. در این مقاله ابتدا به بررسی انواع روش‌های ذخیره نفت در آب‌های عمیق پرداخته شده است و به طور خاص معایب و مزایای روش انبارش نفت در مخازن استوانه‌ای تشریح شده است. سپس مطالعه آماری بر روی مخازن استوانه‌ای انبارش نفت مشابه انجام شده است. برای بهینه‌سازی ابعاد هندسی دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. تابع هدف اول نیروی وارده به مخزن و تابع دوم حرکات قائم مخزن در امواجی با دوره بازگشت 100 ساله می‌باشد. متغیرهای بهینه‌سازی قطر و وزن مخزن می‌باشد. در نهایت نیز ابعاد بهینه محاسبه شده با ابعاد پیشنهادی استخراج شده از مطالعه آماری مقایسه شده است. مقایسه انجام شده براساس بیشینه شتاب قائم مجزا برای امکان انجام فعالیت و زیست خدمه روی مخزن انبارش نفت انجام شده است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، هیدرودینامیک، مخزن استوانه‌ای، مطالعه آماری

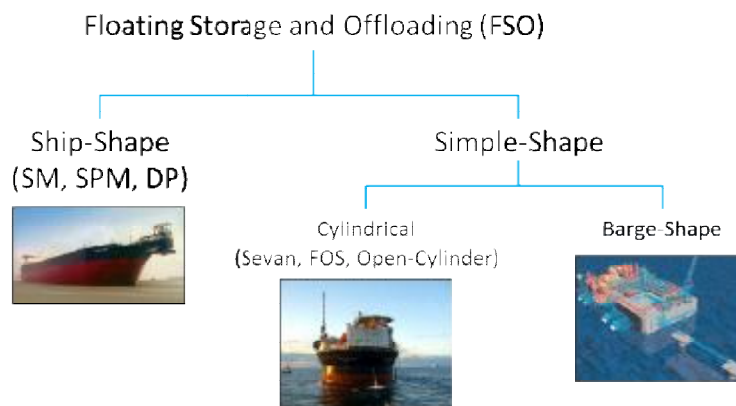
1- مقدمه

نفت بعنوان اصلی‌ترین منبع تولید انرژی در دنیا، همواره جایگاه ویژه‌ای در میان دولت‌ها و شکل‌دهی معادلات سیاسی، اقتصادی و امنیتی دارد. امروزه با توجه به کاهش میزان ذخایر نفتی در مناطق سهل‌الحصول، رشد و توسعه تکنولوژی‌های نفتی به سمت دستیابی و استخراج از منابع کشف شده در آب‌های عمیق سوق یافته است. این موضوع در کشور ایران نیز با توجه به اکتشاف نفت در حوزه آب‌های عمیق منطقه دریای عمان و دریای خزر، بسیار حائز اهمیت گردیده است. از دهه 70 تاکنون که توجه مسئولین به دریای خزر جلب شده است، حدود 46 ساختار نفتی کشف گردیده است. در این میان، 8 ساختار نفتی دریای خزر در رده خوب دسته‌بندی شده‌اند که با توجه به شرایط جغرافیایی منطقه در آب‌های عمیق (500 تا 800 متر) واقع گردیده‌اند. روش‌های ذخیره‌سازی نفت در دریا تا زمان بارگیری و انتقال در شکل 1 نشان داده شده است. علاوه بر سکوهای استخراج از آب‌های عمیق مانند سکوهای پایه کششی، نیمه مغروق و اسپار، شناورهای استخراج، ذخیره و انتقال نفت جزو ادوات کارآمد و اقتصادی در آب‌های عمیق محسوب می‌گردند.



شکل 1: برخی ادوات استخراج و ذخیره‌سازی نفت در آب عمیق

انواع شناورهای ذخیره فرآورده‌های نفتی در دو دسته شناورهای کشتی‌سان و شناورهای اشکال هندسی ساده تقسیم بندی و سپس مورد مطالعه قرار می‌گیرند. تقسیم‌بندی صورت گرفته در شکل 2 قابل مشاهده می‌باشد.



شکل 2: تقسیم‌بندی شناورهای انبارش نفت

- شناورهای انبارش کشتی‌سان
 شناورهای انبارش کشتی‌سان¹، تجهیزاتی شبیه نفتکش هستند که قسمت فوقانی و عرشه کشتی آنها شامل تجهیزات فرآوری اولیه مواد هیدروکربنی می‌باشد. نفت فرآوری شده در مخازن دوجداره زیر عرشه ذخیره می‌گردد و سپس به تانکرهای حمل سوخت یا توسط یک خط لوله به ساحل منتقل می‌شود. از آنجا که این شناورها پس از پایان کار براجتی قابل انتقال به مناطق دیگر می‌باشند، راه حل بسیار مناسبی برای چاه‌هایی با طول عمر کم می‌باشند.

این شناورهای غول پیکر در دو دسته FPSO²ها و FSOها گنجانده می‌شوند. تفاوت این دو گروه در تجهیزات نصب شده بر روی عرشه می‌باشد که شناورهای FPSO علاوه بر ذخیره‌سازی، فرآیند پالایش اولیه بر روی فرآورده‌های هیدروکربنی قبل از انتقال را نیز بر عهده دارد. سیستم مهار F(P)SO در آبهای عمیق به دو صورت خطوط مهار کابلی و مکان‌یابی دینامیکی³ صورت می‌پذیرد. استفاده از خطوط مهار به دو صورت سیستم مهار پراکنده⁴ و تک نقطه‌ای⁵ می‌باشد. در حالت مهاربندی تک نقطه‌ای، عمدتاً خطوط مهار و خطوط انتقال بوسیله Turret به شناور منتقل می‌شوند. شناورهای مجهز به turret عمدتاً برای شرایط دریایی سخت طراحی می‌گردند زیرا که این تجهیزات عظیم و پیچیده به خوبی این امکان را به شناور می‌دهند که با چرخش حول مرکز turret، همواره همجهت با نیروهای محیطی قرار گیرد و شناور با کشش، مهار گردد و همچنین در هنگام پیش‌بینی و بروز طوفان، شناور از سیستم مهار و خطوط انتقال جدا شده و تا پایان طوفان به محل امنی انتقال یابد.

- شناورهای انبارش اشکال هندسی ساده

با توجه به پیچیدگی ساخت بدنه‌های کشتی‌سان، ایده ساخت سازه‌های ذخیره‌سازی فرآورده‌های هیدروکربنی شناور در اشکال هندسی ساده از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. در این نوع سازه‌ها سعی می‌گردد تا از اشکالی همچون استوانه و یا مکعب برای انبارش حجم عظیمی از نفت و گاز استفاده گردد. از مزایای اصلی سکوها شناور استوانه‌ای می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- قابلیت تغییر مقیاس برای ظرفیت‌های مختلف ذخیره‌سازی فرآورده‌های هیدروکربنی
- ظرفیت باربری و تعادل عرشه بالا
- بی‌نیاز به سیستم turret برای چرخش و همجهت‌سازی با بارهای محیطی
- تجهیزات و اتصالات رایزر استاندارد و امکان نصب تعداد بالای رایزر
- هزینه کم برای افزودن رایزرهای جدید به سکو
- رفتار دینامیکی بسیار مناسب در برابر بارهای محیطی
- قابلیت جداسازی سیستم اتصالات رایزرها و کابل‌های نگهدارنده سازه در هنگام وقوع طوفان و امکان اتصال مجدد

1- Ship-Shape F(P)SO
 2- Floating Production, Storage and Offloading (FPSO)
 3- Dynamic Positioning (DP)
 4- Spread Mooring (SM) system
 5- Single Point Mooring (SPM) system

- کاهش پیچیدگی‌های ساخت بدنه و قابلیت ساخت به صورت شناور و نیاز به عمق کم آب (کمتر از 6 متر) برای سوار کردن قسمت‌های مختلف بدنه
 - قابلیت حمل به روش یدک‌کشی یا حمل خشک بوسیله شناور
 - کاهش هزینه‌های نگهداری و ریسک ایست فعالیت سکو
 - عملکرد و کارایی بالا بدلیل حرکات هیو و پیچ/ رول کم
 - تخلیه ایمن و کارآمد فرآورده‌های هیدروکربنی
- مخازن استوانه‌ای دارای سیستم رانش نمی‌باشند و با یدک‌کش جابجا می‌شوند.

2- مطالعه آماری

سکوهای ثابت یکی از طرح‌های جدید شرکت نروژی Sevan Marine است که با تکنولوژی خاص خود برای بهره‌برداری، ذخیره و تخلیه نفت در میادین نفتی آب‌های عمیق بسیار مناسب است. تولیدات اصلی این شرکت ساخت پلتفرم‌های استوانه‌ای شکل برای حفاری و فرآوری نفت از بستر دریا می‌باشد. در شکل 3 انواع سکوهای استوانه‌ای طراحی شده توسط این شرکت نمایش داده شده است. در جدول 1 مشخصات فنی مخازن استوانه‌ای Sevan ارائه شده است.

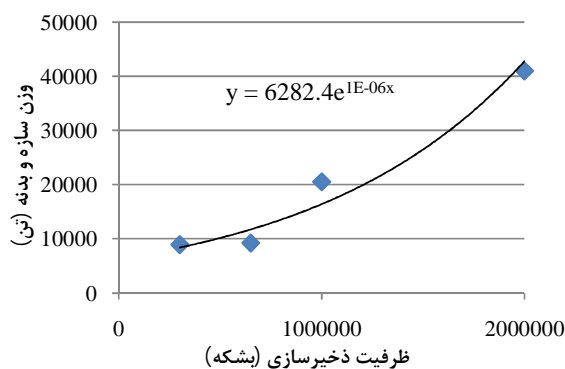
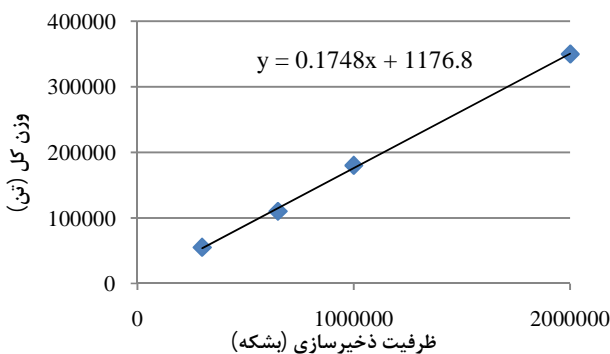
جدول 1: مشخصات فنی مخازن استوانه‌ای Sevan

Sevan 2000	Sevan 1000	Sevan 650	Sevan 300	
2.000.000	1.000.000	650.000	300.000	ظرفیت ذخیره سازی (بشکه)
350.000	180.000	110.000	55.000	وزن کل (تن)
40000-50000	25000-30000	15000-20000	6000-7000	محدوده وزن روی عرشه (تن)
108	90	75	60	قطر بدنه (متر)
-	107	-	66	ارتفاع کل (متر)
33	28	22	18	ارتفاع آب‌خور (متر)



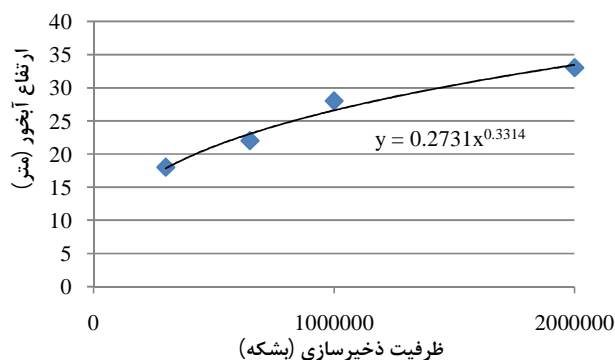
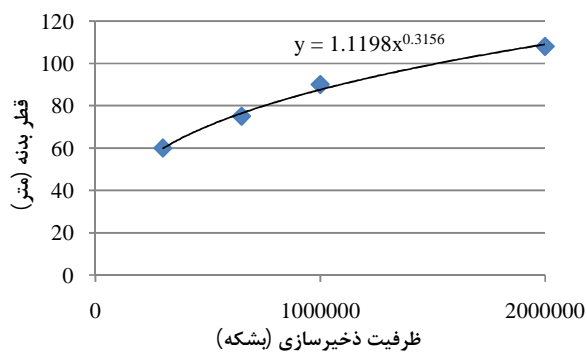
شکل 3: انواع مخازن استوانه‌ای انبارش فرآورده‌های نفتی Sevan [1]

از اطلاعات مندرج در جدول 1 می‌توان به عنوان یک جامعه آماری کوچک استفاده نمود و مطالعه آماری روی این اطلاعات انجام داد. از اطلاعات استخراج شده از مطالعه آماری می‌توان مشخصات فنی مخزن استوانه‌ای با ظرفیتی متفاوت را تخمین زد. در اولین گام از مطالعه آماری می‌توان وزن کل و وزن سازه و بدنه مخازن استوانه‌ای را براساس ظرفیت ذخیره سازی رسم نمود (شکل 4).



شکل 4: وزن کل و وزن سازه و بدنه بر حسب ظرفیت ذخیره سازی مخازن استوانه‌ای

در شکل 4 منحنی خطی برازش شده به نقاط آماری برای استفاده در طراحی مخازن استوانه‌ای جهت تخمین وزن بر حسب ظرفیت ذخیره سازی براساس مطالعه آماری مناسب می‌باشد. همچنین در شکل 4 مشخص می‌باشد، با افزایش ظرفیت ذخیره سازی، نرخ افزایش وزن سازه و بدنه افزایش می‌یابد. شکل 4 منحنی نمایی برازش شده به نقاط آماری برای استفاده در طراحی مخازن استوانه‌ای جهت تخمین وزن سازه بر حسب ظرفیت ذخیره سازی براساس مطالعه آماری مناسب می‌باشد. در شکل 5 اطلاعات آماری ارتفاع آب‌خور و قطر بدنه مخازن استوانه‌ای را براساس ظرفیت ذخیره سازی آن‌ها نشان داده شده است.



شکل 5: قطر بدنه بر حسب ظرفیت ذخیره سازی مخازن استوانه‌ای

در شکل 5 منحنی‌های توانی برازش شده به نقاط آماری برای استفاده در طراحی مخازن استوانه‌ای جهت تخمین ارتفاع آب‌خور و قطر بر حسب ظرفیت ذخیره سازی براساس مطالعه آماری مناسب می‌باشد.

3- طرح مسئله و روش حل

استفاده از مخازن انبارش فرآورده‌های هیدروکربنی در کنار سکوه‌های استخراج این فرآورده‌ها، موجب می‌گردد تا همواره فرآیند استخراج صورت پذیرد و تا فرارسیدن شناورهای انتقال، نیاز به قطع این فرآیند نباشد. در کشور ایران نیاز به عنوان کشوری با منابع غنی نفت و گاز در حوزه خلیج فارس و دریای خزر ضرورت طراحی و ساخت چنین مخازنی وجود دارد و این ضرورت در دریای خزر به دلیل عمق زیاد نسبت به خلیج فارس بیشتر می‌باشد. در ادامه به تعیین ابعاد بهینه و مناسب برای مخزن استوانه‌ای جهت ذخیره سازی روزانه 10 تا 15 هزار بشکه نفت به مدت 10 روز دریای خزر پرداخته می‌شود. لازم است به این نکته توجه شود که این مخزن در حوضچه خشکی به طول 250 متر، عرض 40 متر و ارتفاع 11 متر ساخته می‌شود.

از دو روش ابعاد مخزن استوانه‌ای با قابلیت‌های فوق تعیین خواهد شد. ابتدا براساس مطالعه آماری انجام شده و سپس در روش دوم با استفاده از بهینه‌سازی دو تابع هدف: نیروی وارده از امواج به مخزن استوانه‌ای و تعیین بیشینه حرکات قائم آن ابعاد بهینه برای مخزن استوانه‌ای تعیین می‌گردد. سپس ابعاد و مشخصات بدست آمده براساس مطالعه آماری با ابعاد بهینه تعیین شده از بهینه‌سازی با توجه به معیار شتاب قائم مجاز جهت امکان زیست خدمه مقایسه می‌شود و ابعاد مناسب برای مخزن استوانه‌ای برای کاربری فوق تعیین می‌گردد.

4- تعیین ابعاد براساس مطالعه آماری

مخزن استوانه‌ای باید قابلیت ذخیره سازی روزانه 10 تا 15 هزار بشکه به مدت 10 روز را داشته باشد. یعنی دارای ظرفیت 100 تا 150 هزار بشکه باشد. با مشخص بودن ظرفیت ذخیره‌سازی صرف نظر از محدودیت حوضچه خشک جهت ساخت مخزن، می‌توان دیگر مشخصه‌های فنی مخزن استوانه‌ای را براساس مطالعه آماری تعیین نمود. در جدول 2 مشخصات فنی مخزن استوانه‌ای با سه ظرفیت کنجایش 100، 125 و 150 هزار بشکه براساس مطالعه آماری ارائه شده است.

جدول 2: مشخصات فنی مخزن استوانه‌ای در سه ظرفیت مختلف براساس مطالعه آماری

100 هزار بشکه	125 هزار بشکه	150 هزار بشکه	
18600	23000	27300	وزن کل (تن)
3250	2730	2220	وزن بدنه و سازه (تن)
42	45/5	48	قطر بدنه (متر)
49	52	56	ارتفاع کل (متر)
12/8	13/8	14/7	ارتفاع آبخور (متر)

با توجه به مشخصات ارائه شده در جدول 2 برای طراحی مخزن استوانه‌ای با ظرفیت 150 هزار بشکه نیاز به استوانه‌ای به قطر 48 متر می‌باشد. از طرف دیگر یکی از قیود مسئله که در بخش 3 ارائه گردید ابعاد حوضچه خشک می‌باشد که نمی‌توان مخزن استوانه‌ای با قطر بیشتر از 40 متر در آن ساخت.

5- تعیین قطر بهینه مخزن استوانه‌ای

با توجه به اهمیت بخش‌های مختلف یک پدیده و یا هندسه فیزیکی مورد بررسی یک تابع هدف¹ تا چندتابع هدف² در بهینه‌سازی می‌توان داشت. در مسائل بهینه‌سازی تک هدفه، بهینه کردن یک تابع هدف مد نظر می‌باشد و یک جواب بهینه وجود دارد که نسبت به سایر جواب‌ها دارای ارجحیت است و در مسائل چند تابع هدف، هدف بهینه کردن همزمان چند تابع می‌باشد که در برخی موارد این توابع در تضاد با هم می‌باشند به این مفهوم که با بهینه کردن یکی از توابع، تابع دیگر از شرایط بهینه خارج می‌شود. لذا در مسائل چند هدفه تنها یک جواب وجود ندارد که نسبت به همه توابع جواب بهینه باشد، بلکه مجموعه‌ای از جواب‌ها پاسخ مساله است. به طور کلی یک مسئله بهینه‌سازی براساس روابط ریاضی به صورت زیر مطرح می‌شود.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } y = f(x) \\
 & \text{subject to } g(x) = \{g_1(x), g_2(x), \dots, g_J(x)\} \leq 0 \\
 & \quad \quad \quad h(x) = \{h_1(x), h_2(x), \dots, h_K(x)\} \\
 & \text{where } x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \in X
 \end{aligned} \tag{1}$$

که x بردار متغیرها، y بردار توابع هدف (برای مسئله‌ای با چند تابع هدف $f_1(x)$ تابع هدف اول، $f_2(x)$ تابع هدف دوم و ...)، X فضای تصمیم‌گیری می‌باشد. در ضمن $g(x)$ قیود نامساوی و $h(x)$ قیود مساوی مساله می‌باشند.

5-1 متغیرها

متغیر اصلی بهینه‌سازی حجم ذخیره‌سازی و قطر مخزن استوانه‌ای مورد نیاز می‌باشد.

5-2 قیود

قیدهای مسئله بهینه‌سازی پیش‌رو مواردی می‌باشد که در بخش 3 اشاره شده است. همچنین محدوده تغییر قطر مخزن استوانه‌ای بین 20 تا 70 متر در نظر گرفته شده است.

5-3 توابع هدف

دو پارامتر در طراحی هر سازه شناوری در دریا مهم می‌باشد: 1- نیروی وارد به آن و 2- حرکات آن در امواج. پس یکی از توابع هدف نیروی وارد به مخزن استوانه‌ای از امواج و دیگری حرکات هیو ایجاد شده از امواج می‌باشد.

بدترین شرایط برای امواج 100 ساله دریای خزر موجی به ارتفاع 14 متر و دوره تناوب 11 ثانیه می‌باشد. چنین موجی در آب عمیق دارای طولی موجی برابر مقدار زیر می‌باشد.

$$l = \frac{gT^2}{2p} = \frac{9.81 \times 11^2}{2p} = 189m \quad (2)$$

- تابع هدف اول (نیروی وارده از امواج)

امواج دریایی ماهیتی تصادفی و اتفاقی دارند و به صورت تناوبی و تکرارپذیر هستند و موجب اعمال نیروهای بزرگی به سازه‌های دریایی می‌شوند. اتفاقی بودن، تناوبی بودن و جهت‌های مختلف و انرژی‌های متفاوت امواج همگی سبب می‌شوند تا برای امواج و اثرات آن بر روی سازه پیچیدگی‌های منحصر به فردی داشته باشند. از سوی دیگر نیروهای ناشی از امواج به سبب تداخل و همراهی آن با بحث اندر کنش سازه می‌تواند بسیار پیچیده و مشکل گردد. اساساً بیشتر تئوری‌های دقیق این نیروها بر پایه تئوری‌های غیرخطی موج و نیز قبول تصادفی بودن امواج و شرایط محیطی دریاست و این فراگیری و عمومیت موضوع را بیش از پیش مشکل‌تر می‌کند. اما بخش عمده‌ای از این تئوری‌ها و روش‌هایی که در دسترس است وابسته به مطالعات تحلیلی و تجربیات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های میدانی بوده و در کنار هم نتایج دقیق و قابل اطمینانی در پیش‌بینی بارهای وارد بر سازه‌ها ارائه می‌دهند.

با توجه به نوع و اندازه سازه شناور روش‌های مختلفی در هیدرو مکانیک دریا برای محاسبه بار و تحلیل حرکات سازه‌های دریایی ارائه شده است. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به رابطه موریسون، فرود کریلوف و تئوری تفرق اشاره نمود.

در صورتی که $D/\lambda < 0.1$ باشد، معادله موریسون قابل اعمال خواهد بود. در صورتی که $D/\lambda > 0.2$ باشد، حتماً باید از تئوری تفرق استفاده شود و در صورتی که $0.1 < D/\lambda < 0.2$ می‌توان از تئوری فرود-کریلوف برای محاسبه نیروی موج وارد بر سازه استفاده کرد [2]. قطر سازه شناور D و طول موج λ می‌باشد. با توجه به طول موج 189 متر و قطر حدوداً 40 متری نسبت قطر به طول موج 0/21 می‌باشد و در نتیجه از روش تفرق برای محاسبه نیروی وارد به مخزن استوانه‌ای مناسب می‌باشد.

زمانی که ابعاد سازه و اجزای آن در مقایسه با طول موج به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ باشد. انتظار می‌رود که حضور سازه در میدان موج اطراف آن تغییرات و تلاطم ایجاد اضافی نماید و لذا امواج بعد از برخورد با سازه دچار تفرق و شکست خواهند شد و در این صورت باید این پدیده در محاسبه نیروی موج مد نظر قرار گیرد. چگونگی تغییر شکل امواج بعد از برخورد با سازه فقط با حل کامل معادله لاپلاس و با در نظر گرفتن شرایط روی سطح جسم شناور، شرط سطح آزاد آب و بستر دریا صورت می‌گیرد. در واقع در تخمین نیروهای وارده به سازه شناور به روش تفرق نیاز به حل عددی می‌باشد که نیاز به زمان حل و حجم محاسبات قابل توجهی می‌باشد.

همواره تأثیر تفرق موج سودمند است، چرا که عموماً منجر به کاهش نیروهای امواج نسبت به حالتی می‌شود که از اثرات تفرق صرف نظر شده است. در واقع چنانچه تغییرات سینماتیک امواج برخوردی در جهت انتشار موج در نظر گرفته نشود و در نتیجه از ضریب اینرسی مربوط به یک سازه لاغر استفاده شود، نتایج حاصل عموماً تخمین دست بالایی از نیروهای اعمالی واقعی خواهند بود.

با توجه به شرایط زیر از روش موریسون به جای روش تفرق برای محاسبه نیروهای وارده به مخزن استوانه‌ای استفاده می‌شود.

- حجم محاسبات نیروهای وارده با استفاده از روش تفرق بالا می‌باشد. به دلیل اینکه در این قسمت محاسبات مهاربندی صورت نمی‌گیرد نیاز به حجم بالای محاسبات نیست.

- در این مرحله از پروژه استفاده از روش موریسون تخمینی دست بالا از نیرو را به همراه خواهد داشت که به دلیل جنبه مقایسه‌ای نیروی حاصل برای قطرهای مختلف، خدشه در نتایج این گزارش وارد نمی‌شود. در این گزارش بیشتر نیاز به تخمین قابل قبول هر چند دست بالا از نیرو وارده از امواج به مخزن استوانه‌ای می‌باشد.

- با استفاده از روش موریسون شرایط بدتری نسبت به واقعیت وارد مسئله می‌شود که با طراحی در این شرایط می‌توان اطمینان بیشتری به قابل اجرا بودن نتایج تحقیقات داشت.

در این روش موریسون نیروی کل وارد بر سازه در جهت حرکت موج از مجموع نیروی ناشی از درگ (F_D) و نیروی ناشی از اینرسی (F_I) بدست می‌آید [3].

$$F \quad (3)$$

نیروی ناشی از درگ (F_D) متناسب با خصوصیات کینتیک ذرات موج می‌باشد:

$$F \quad (4)$$

که در آن C_D ضریب درگ (مقدار آن وابسته به شکل و زبری و ویسکوزیته سیال)، ρ چگالی سیال، A مساحت تصویر شده عضو سازه در معرض موج و u سرعت امواج می باشد.

نیروی اینرسی (F_I) وابسته به شتاب سیال برخوردی می باشد و به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$F \quad (5)$$

که در آن C_m ضریب اینرسی (مقدار آن وابسته به شکل جسم، زبری سطح و دیگر پارامترهای فیزیکی)، V حجم سیال جابجا شده توسط جسم و \dot{u} شتاب ذرات سیال می باشد.

از آن جایی که u و \dot{u} در طول سازه تغییر می کنند لذا معادله نیروی کل وارد بر مخزن استوانه ای در واحد طول به صورت زیر خواهد شد [3]:

$$F \quad (6)$$

در آب های عمیق سرعت (u) و شتاب (\dot{u}) ذرات سیال به صورت زیر می باشد [4].

$$u \quad (7)$$

$$\dot{u} \quad (8)$$

که ω فرکانس امواج، k عدد موج و A دامنه موج می باشد.

- تابع هدف دوم (جابجایی قائم)

معادله دینامیکی δ درجه آزادی یک جسم بر اساس اصول دینامیک و ارتعاشات به فرم زیر است:

$$M \quad (9)$$

که در رابطه فوق ماتریس های M و B و C به ترتیب ماتریس های جرم به علاوه ضریب جرم اضافی و ضرایب امپینگ و ضرایب بازگرداننده یا ماتریس سختی می باشند که همگی ماتریس های $[6 \times 6]$ هستند. ماتریس های \dot{X} و \ddot{X} و X ماتریس های δ عضوی ستونی هستند که به ترتیب عبارت اند از ماتریس شتاب و سرعت و جابجایی مربوط به حرکات انتقالی در راستای محورهای مختصات و حرکات دورانی حول آن ها. با توجه به این که حرکت هیو مخزن استوانه ای مورد نظر می باشد، دستگاه معادلات فوق به یک معادله دیفرانسیلی مرتبه دوم تحت اثر نیروی خارجی موج به صورت زیر تبدیل می گردد [5].

$$(\quad) \quad (10)$$

که m_a جرم اضافه، b ضریب میرایی، k ضریب سختی، $\bar{\omega}$ فرکانس امواج و F_{wave} نیروی وارده از امواج می باشد. معادله (10) دارای جواب عمومی و خصوصی می باشد. با توجه به این که جابجایی و سرعت اولیه مسئله صفر می باشد در نتیجه جواب عمومی نیز صفر می باشد.

جواب خصوصی معادله (10) به صورت زیر بدست می آید:

$$x \quad (11)$$

ضرایب C و D را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$C \quad (12)$$

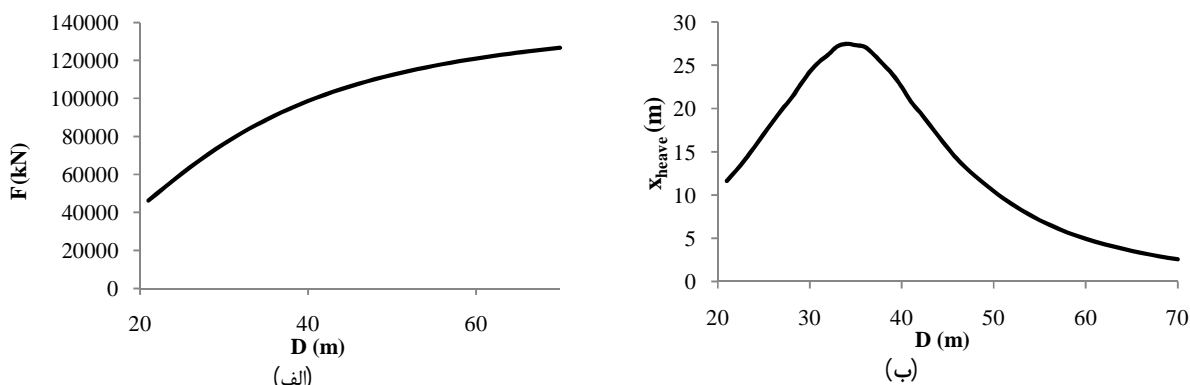
$$D \quad (13)$$

پارامترهای مجهول موجود در روابط فوق به صورت زیر بدست می آیند [6].

پارامتر	رابطه	توضیحات
m_a		جرم اضافه در راستای قائم، D قطر، ρ چگالی سیال
ω_n		فرکانس طبیعی سیستم، m جرم سازه
k		ضریب سختی سیستم
b		ضریب میرایی سیستم، ξ نسبت میرایی ($\xi=0/25$)
		--

4-5 نتایج بهینه‌سازی

تغییرات دو تابع هدف ارائه شده (نیروی و بیشینه حرکات وارده از امواج) در بخش قبل بر حسب قطر برای ظرفیت ذخیره‌سازی 150 هزار بشکه در شکل 6 نشان داده شده است. لازم به ذکر است حرکات محاسبه شده بدون لحاظ کردن سیستم مهاربندی می‌باشد و قطعاً وجود این سیستم حرکات مخزن را به میزان قابل توجهی کاهش خواهد داد.



شکل 6: تغییرات نیرو (الف) و بیشینه جابجایی قائم (ب) مخزن استوانه‌ای برای ذخیره‌سازی 150 هزار بشکه

همانطور که در شکل 6 مشخص می‌باشد مرتبه مقادیر نیرو و جابجایی مخزن استوانه‌ای با یکدیگر تفاوت زیادی دارند. برای آن که بتوان این دو تابع هدف را در کنار هم بررسی نمود نیاز است که دارای وزن یکسانی در بهینه‌سازی باشند به همین دلیل نیاز است که توابع هدف نرمالایز شوند. از روابط زیر برای نرمالایز نمودن توابع هدف استفاده می‌گردد.

$$(14)$$

c

$$(15)$$

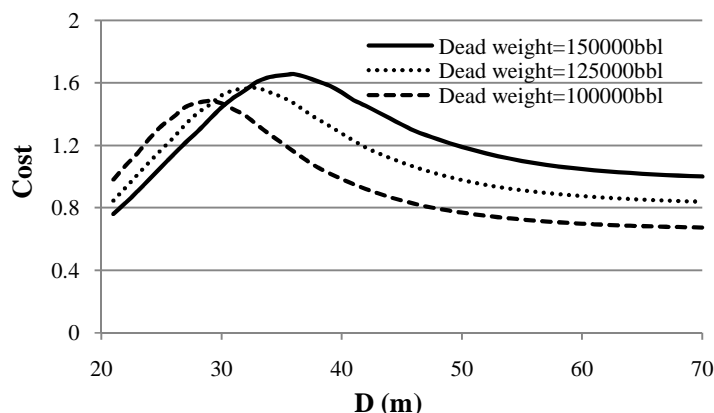
c

مقادیر بیشینه مورد نیاز در روابط (14) و (15) (از شکل 6 استخراج می‌گردد). با نرمالایز شدن توابع هدف حال می‌توان از تابع هدف کلی زیر استفاده نمود.

$$(16)$$

c

تغییرات تابع هدف براساس قطر برای ظرفیت ذخیره‌سازی 150 هزار، 125 هزار و 100 هزار بشکه در شکل 7 رسم شده است.



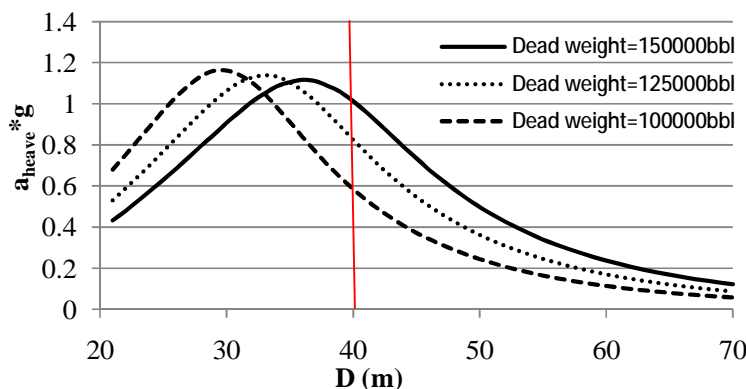
شکل 7: تغییرات تابع هدف براساس قطر مخزن استوانه‌ای برای ظرفیت ذخیره‌سازی 150، 125 و 100 هزار بشکه

با توجه به شکل 7 در قطرهای حدود 30 تا 40 متر بیشترین مقدار تابع هدف وجود دارد که این بدین معنا است که در این محدوده از قطر مقدار نیرو و جابجایی مخزن استوانه‌ای بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش وزن بیشترین مقدار تابع هدف به قطرهای پایین‌تر از 30 متر انتقال می‌یابد. با توجه به محدودیت عرض حوضچه خشک (عرض برابر 40 متر)، طراحی مخزن استوانه‌ای با ظرفیت ذخیره‌سازی 150 هزار بشکه با قطر 40 متر و کمتر از آن منطقی نمی‌باشد. زیرا بیشترین مقدار تابع هدف برای مخزن استوانه‌ای 150 هزار بشکه در محدوده قطر 40 متر قرار دارد. لازم به ذکر است که قطرهای کمتر از 25 متر نیز دارای مقادیر تابع هدف پایینی می‌باشند ولی انتخاب قطر

مخزن استوانه‌ای از این محدوده منطقی نیست. زیرا مساحت موجود روی عرشه با قطر حدود 25 متر یا کمتر برای نصب و بکارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات مورد نیاز کافی نمی‌باشد. همچنین به شدت به ارتفاع مخزن استوانه‌ای افزوده می‌شود تعادل استاتیکی نامناسبی ایجاد خواهد شد و احتمال واژگون شدن در امواج بوجود خواهد آمد.

تا به حال مشخص گردیده است که در محدوده 150 هزار بشکه تا 100 هزار بشکه هرچه قطر مخزن استوانه‌ای بیشتر باشد می‌توان حرکات و نیروی وارده از امواج کمتری را برای مخزن استوانه‌ای متصور شد. اما حال این سوال پیش می‌آید که اگر قطر بخواند در حدود 40 متر یا بیشتر باشد، چه قطری مناسب است.

برای پاسخ به این سوال معیاری با عنوان شرایط زیست خدمه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که در این مطالعه سیستم مهاربندی برای مخزن در نظر گرفته نشده است و در واقع مخزن استوانه‌ای مانند یک سازه شناور در دریا فرض شده است. از شرایط مناسب جهت زیست خدمه شناورهای برای مخزن استوانه‌ای استفاده می‌شود. قابلیت زیست خدمه شناورها براساس استاندارد DNV زمانی قابل قبول می‌باشد که شتاب عمودی کمتر از 1g باشد. با دو مرتبه مشتق‌گیری از رابطه (11) می‌توان تغییرات شتاب مخزن استوانه‌ای را تخمین زد. در شکل 8 تغییرات شتاب برحسب قطر برای مخزن استوانه‌ای با ظرفیت ذخیره‌سازی 150، 125 و 100 هزار بشکه نشان داده شده است.



شکل 8: تغییرات بیشینه شتاب عمودی برای مخزن استوانه‌ای با ظرفیت ذخیره‌سازی 150، 125 و 100 هزار بشکه

با توجه به شکل 8 برای آن که در محدوده قطر 40 متر شتاب قائم کمتر از 1g باشد مخزن استوانه‌ای می‌تواند ظرفیت ذخیره‌سازی 125 هزار یا 100 هزار بشکه را داشته باشد.

6- مقایسه نتایج مطالعه آماری با بهینه‌سازی

در بخش 4 و 5 به دو صورت به بررسی و تعیین ابعاد مخزن استوانه‌ای جهت انبارش فرآورده‌های نفتی پرداخت شد. در مرحله اول مطالعه آماری انجام شده است و از روابط آماری بدست آمده برای تعیین ابعاد مخزن استوانه‌ای با سه ظرفیت ذخیره‌سازی 150، 125 و 110 هزار بشکه استفاده شده است. همچنین با استفاده از روابط ریاضی مرسوم قطر مناسب برای مخزن استوانه‌ای با سه ظرفیت ذخیره‌سازی 150، 125 و 110 هزار بشکه انجام شده است.

در جدول 3 نتایج تعیین ابعاد مخزن استوانه‌ای براساس مطالعه آماری و محاسبات بهینه‌سازی برای سه ظرفیت ذخیره‌سازی 150، 125 و 100 هزار بشکه ارائه شده است.

جدول 3 مشخصات مخزن استوانه‌ای برای ذخیره‌سازی 150، 125 و 100 هزار بشکه

100 هزار بشکه		125 هزار بشکه		150 هزار بشکه		
مطالعه آماری	ابعاد بهینه	مطالعه آماری	ابعاد بهینه	مطالعه آماری	ابعاد بهینه	
42/5	40	45/5	40	48	40	قطر (متر)
13200		23000		19800		وزن مرده (تن)
18600		16500		27300		وزن (تن)
12/8	14	13/8	17	14/7	21/5	ارتفاع آبخور (متر)
49	53/5	52	41	56	45	ارتفاع کلی (متر)
0/545	0/64	0/54	0/825	0/58	1/01	شتاب عمودی برحسب g

با توجه به محدوده مجاز شتاب که میبایست کمتر از $1g$ باشد، ابعاد بهینه برای ظرفیت ذخیره‌سازی 125 و 100 هزار بشکه مناسب می‌باشد. از طرف دیگر اگر ابعاد و اندازه‌های نمونه‌های مشابه مدنظر باشد و بخواهد ابعاد بهینه‌ای انتخاب شود که به ابعاد پیشنهادی براساس مطالعه آماری نزدیک باشد، ابعاد بهینه ارائه شده برای مخزن استوانه‌ای با ظرفیت ذخیره‌سازی 100 هزار بشکه مناسب می‌باشد. ارتفاع کل برای ابعاد بهینه از مجموع ارتفاع آبخور، ارتفاع موج با دوره بازگشت 100 ساله و حاشیه اطمینان 10 متر بدست آمده است.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی و بهینه‌سازی ابعاد هندسی مخازن استوانه‌ای جهت انبارش نفت در دریای خزر پرداخته شد. براساس تحقیق ارائه شده می‌توان به چرایی و نکات فنی در نظر گرفته شده برای تعیین ابعاد هندسی مخازن استوانه‌ای مشابه پاسخ داد. ابتدا انواع روش‌های انبارش نفت در آب‌های عمیق بررسی و مزایای استفاده از روش مخزن استوانه‌ای تشریح گردید. همچنین مطالعه آماری بر روی مخزن استوانه‌ای مشابه انجام شد که روابط آماری بین وزن کل، وزن سازه و تجهیزات، قطر و ارتفاع آبخور بر حسب ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن ارائه گردید. سپس با استفاده از روابط هیدرودینامیکی دو تابع هدف نیروی وارده از امواج و حرکت قائم در امواج برای مخزن استوانه‌ای با ظرفیت 100 تا 150 هزار بشکه نفت در نظر گرفته شد و تغییر رفتار این دو تابع هدف براساس قطر مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد انتخاب قطر در بازه 40 تا 30 متر، محدوده مناسبی نمی‌باشد و هر چه قطر بیشتر از 40 متر باشد توابع هدف کمینه می‌گردد. اما به دلیل محدودیت در ساخت مخزن استوانه‌ای در حوضچه خشک با قطر بیشتر از 40 متر، امکان افزایش قطر نبود. در نتیجه با کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی به 100 هزار بشکه توابع هدف برای قطر 40 متر در محدوده مناسبی قرار گرفتن و در ضمن ابعاد بهینه با ابعاد بدست آمده از مطالعه آماری مطابقت خوبی داشته است. وزن کل در تعیین ابعاد بهینه براساس مطالعه آماری تخمین زده شده است. همچنین امکان زیست و فعالیت خدمه روی مخزن استوانه‌ای با تعیین معیار حداکثر شتاب قائم برابر $1g$ در نظر گرفته شد که ابعاد بهینه و ابعاد محاسبه شده براساس مطالعه آماری برای مخزن با ظرفیت ذخیره‌سازی به 100 هزار بشکه کمتر از این مقدار می‌باشد.

8- مراجع

[1] <http://www.sevanmarine.com>

[2] لطف‌اللهی یقین، م.ع.، احمدی، "دینامیک سازه‌های فراساحلی"، انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز، 1390.

[3] Journee, J.M., Massie W.W., OFFSHORE HYDRODYNAMICS, Delft University, 2001.

[4] Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., "Water waves Mechanics for Engineers and Scientists", World Scientific, 1994.

[5] تابش‌پور، م.ح.، "تحلیل ارتعاشی سکوهاى آب‌های عمیق (دریای خزر و عمان)"، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، 1392.

[6] Ghadimi, P., Paselar Bandari, H. and Bakhshandeh Rostami, A., "Determination of the Heave and Pitch Motions of a Floating Cylinder by Analytical Solution of its Diffraction Problem and Examination of the Effects of Geometric Parameters on its Dynamics in Regular Waves", International Journal of Applied Mathematical Research, Vol.1, No. 4, pp. 611-633, 2012.