مروری بر تجربیات موجود در زمینه سکوی اسپار برای آب‌های عمیق

محمدرضا تابش پور* ● حمیدرضا قیصری** ● محمدسعید سیف***

چکیده
نفت به عنوان اصلی‌ترین منبع تولید انرژی در جهان مطرح است و از این رو اکتشاف و استخراج آن از دل زمین یا دریا اهمیت بالایی دارد. بسیاری از این منابع در اعماق دریا وجود دارند و استخراج آنها مستلزم دستیابی به دانش طراحی و تکنولوژی ساخت سکوها و ادوات استخراج در آب‌های عمیق است. حجم عظیمی از ذخایر نفتی در بستر آب‌های عمیق وجود دارد.در عمق زیاد، استفاده از سکوهای ثابت بسیار غیراقتصادی است، همچنین می‌دانیم پریود طبیعی این سازه‌ها نزدیک به پریود موج در آب عمیق است، در نتیجه تحقیقات و صنایع استخراج در آب عمیق به سمت استفاده از سکوهای تطبیقی مثل ALP، TLP، TBT و... پیش رفته‌اند. اسپار در میان این سکوها تازه‌ترین سکوی به‌کارگرفته شده برای استخراج در آب عمیق است. ایده اصلی اسپار ساخت یک سازه ساده با پریود طبیعی خیلی پایین‌تر از دامنه فرکانس موج اقیانوس، به منظور کاهش پاسخ دینامیکی سازه است. اسپار یک سکوی شناور قابل رقابت برای آب عمیق و خیلی عمیق در استخراج نفت و گاز است.

کلمات کلیدی: سکوی تطبیقی، سکوی اسپار، تحلیل و آنالیز اسپار.

مقدمه

صنایع فراساحل به سمت استخراج نفت و گاز در آب‌های عمیق و عمیق‌تر می‌رود و بسیاری از ابداعات صنایع فراساحل در زمینه سکوهای شناور به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه است. به جهت کاهش پاسخ ناشی از موج، فرکانس طبیعی سازه از فرکانس قله طیف موج و نیرو باید دور نگه داشته شود. سکوی اسپار به عنوان یک سکوی تطبیقی برای آب عمیق با داشتن هر دو ویژگی به‌منظور حفاری، استخراج، پالایش، ذخیره و انتقال در اقیانوس کاربرد دارد. بدنه استوانه‌ای مغروق دارای آبخور زیادی نسبت به فریبورد سازه است، به علاوه وزن زیاد سازه که سبب می‌شود در اندر کنش موج و سازه، حرکت اسپار میرا شود و نسبت به سایر سکوهای شناور پاسخ بهتری داشته باشد. در این تحقیق سعی داریم به معرفی این سکو و خصوصیات و دلایل به‌کارگیری آن در سال‌های اخیر بپردازیم.

انواع سازه‌های مناسب برای دریاهای عمیق

در اوایل شناخت منابع نفتی، استخراج نفت بیشتر از مناطق کم‌عمق صورت می‌گرفت، اما به مرور و با کاهش ذخایر این بخش‌ها و علاوه بر آن اثبات وجود نفت در مناطق عمیق‌تر، امروزه در نقاط مختلفی از دنیا به صنایع استخراج نفت از آب‌های عمیق پرداخته می‌شود. دراینجا به طور خلاصه کلیاتی در مورد سکوهای مختلف که برای آب‌های عمیق مناسب هستند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.در برخی از سکوهای دریاهای عمیق، ایده کلی، استفاده از تعادل شناوری سازه فوقانی است. در بعضی نیز نظیر آب‌های کم‌عمق، وزن سازه به کف دریا منتقل می‌شود. در شکل ۱انواع سازه‌های مناسب برای آب‌های عمیق نشان داده شده است.

معرفی سکوی اسپار

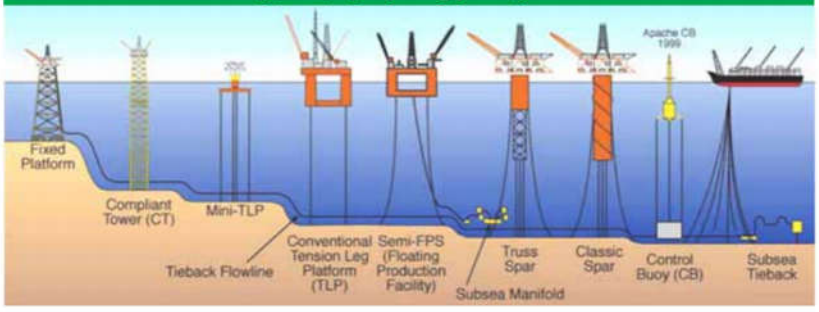
اسپار یک سازه جدید نیست و تاریخچه استفاده از آن به قبل از سکوی پایه‌کششی برمی‌گردد. سازه این سکو برای اولین بار در سال ۱۹۶۲ با ساخت اسپار Flip ship آن هم برای مقاصد اقیانوس‌شناسی مورد بهره‌برداری قرارگرفت. اسپارهای دیگری نیز با مقاصد اقیانوس‌شناسی، بویه و حتی به عنوان سازه چراغ دریایی بهره‌برداری شدند. اما در زمینه استخراج منابع نفتی، پتانسیل استفاده از سکوی اسپار به عنوان یک سکوی تطبیقی برای آب‌های عمیق در سال ۱۹۷۰ با

ساخت اسپار Brent ازسوی شرکت Royal Dutch بـه عنوان سـکویی بـرای ذخیره و انتقال نفت مورد توجه قرار گرفت. تا دهه ۷۰ تحقیق بر سـکوی اسـپار به عنوان یک سازه اقتصـادی با کارایی مورد قبول ازسـوی چند شرکت نفتی ادامه داشـت تا نهایتا این سکو به عنوان یک سـکوی اقتصادی بـا دریامانی مناسـب و با امکان بهره‌بـرداری چندمنظوره معرفی شـد. در سال ۱۹۹۱ گرانویل در پروژه سـاخت سکوی نپتون برای اولین بار جزئیات سـاخت و نصب اسـپار را ارائه و این سازه را برای عملیات پیش از حفاری و حفاری چه از لحاظ ساخت و چه از لحاظ انتخاب تجهیزات، سازه‌ای انعطاف‌پذیر و اقتصادی معرفی کرد.

کلیات اسپار به شرح زیر است:

- ایـن سـکو به‌تنهایی می‌توانـد تا عمق بیش از ۳۰۰۰ متـر، عملیات کامل حفاری و استخراج نفت را انجام دهد.
- عدم حساسیت هزینه به عمق آب.
- این سـکو تحمل بارهای بالا را بر عرشه خود دارد.
- رایزرها ازطریق دیواره مرکزی محافظت می‌شود.
- این سازه به‌دلیل پایین بودن مرکز جرم از مرکز بویانسی همواره پایدار است.
- بدنه سـکو را می‌توان به‌صورت فولادی، بتنی یا ترکیب آنها ساخت.
- اسـپار دارای حداقل سطح بدنه و عرشه مواجهه با موج و باد است.
- قابلیت ذخیره نفت بـا حداقل هزینه را داراست.
- دارای شرایط دریامانی مناسب‌تری برای حفاری و پشـتیبانی از رایزرها نسبت به سایر شناورهای حفاری است.

شکل ۱ - انواع سکوهای آب عمیق



- سیسـتم مهار زنجیـری(catenary) اسپار دارای هزینه نصب، نگهداری و جابه‌جایی کمتری نسبت به سایر سیستم‌های مهار است.
- اسـپار می‌توانـد به‌صورت یک سـکوی حفاری متحرک استفاده شود.
- رایزرها در اسپار از منطقه تحت اثر موج دور هستند و سیستم حفاری در داخل دیواره مرکزی اسـپار قرار دارد که سبب می‌شود از جریان و موج دور نگه داشته شود.

پیکربندی سازه سکوی اسپار (SPAR Platform, SPAR)

اسـپار دارای چند نوع سازه با ویژگی‌های قابل توجه است که بسته به منطقه عملیاتی و شرایط مورد نیاز انتخاب می‌شود. برای اسپار چهـار نوع پیکره اصلی می‌توان قائل شـد که عبارتند از:

اسپار کلاسیک(classic spar)، اسپار خرپایی (Truss spar)، اسپار سلولی(cell spar)، اسپار سلولی- خرپایی(cell truss spar).

شکل ۲ - اسپار کلاسیک

طراحی‌های مختلف اسـپار با پیشـرفت تکنولوژی و ابتکارهای صنعتی با هدف توسعه مدل‌هـای قبلی و کاهـش هزینه‌های جاری انجام شده است.

اسپار کلاسیک

این سکو به صورت یک سـازه استوانه‌ای شـناور است که دارای سازه فوقانی (عرشه) و رایزرهای بهره‌برداری، حفـاری و انتقال بوده و به‌وسیله سیسـتم کاتنری به کف دریا مهار می‌شـود. در شکل ۲ یک نمونه سکوی اسپار ملاحظه می‌شود. این سکوها برای اعماق زیاد (بالای ۱۰۰۰ متر) مناسب است. با استفاده از تکنولوژی موجود می‌توان از این نوع سـکوها تا عمـق ۲۵۰۰ متری نیز اسـتفاده کرد. در مدل‌سـازی، هر خط مهار به صورت یک فنر غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. پریود حرکت طولـی حدود چند دقیقه بـوده و نیز حرکت قائم دارای پریود حدود نیم دقیقه است. برخی از مزایای اسپار عبارتند از:

- رفتـار دینامیکی مطلوب در مقایسـه با سایر سیستم‌ها
- پایـداری (مرکز شـناوری بالاتر از مرکز جرم است)
- قابلیت استفاده در اعماق زیاد (بیشتر از ۳۰۰۰ متر)

اسـپار کلاسـیک که متداول‌تریـن نوع سکوی اسـپار و اولین پیکربندی برای اسپار است، شامل بدنه استوانه یکپارچه‌ای می‌شود که در برخی موارد تنها قطر این اسـتوانه در

شکل ۳ - انواع اسپار

طول شناوری تغییر می‌کند.

این استوانه خود شامل سه بخش است:

• قسمت فوقانی که معروف به Hard tank است و در اینجا تانک بزرگ نیز می‌گوییم، بویانسی لازم برای سازه را فراهم می‌کند.

• قسمت میانی که بخش اصلی شناوری را تشکیل می‌دهد و می‌توان برای ذخیره نفت و فضای لازم برای عملیات استخراج از آن بهره برد.

• بخش پایینی اسپار تحت عنوان Soft/keel tank که ازآن با عنوان تانک کوچک نام برده شده است و وظیفه بالاست و کنترل تریم و دریفت سازه را برعهده دارد.

ترکیب قسمت‌های سازه و جرم آب حصر شده در بخش‌های مغروق پایداری خوبی در برابر بارهای محیطی ایجاد می‌کند. برای مثال پریود پاسخ اسپار در خلیج مکزیک حدود ۳۵۰ثانیه در سرج، ۶۰ثانیه در پیچ و ۲۸ ثانیه در هیو است.

این سکو به‌دلیل سختی کمی که دارد، دارای پریود طبیعی پایینی است. المان‌های غیرخطی به‌دلیل ابعاد بزرگ سکو حتما باید در نظر گرفته شود. طراحی اسپار به‌گونه‌ای است که می‌توان از آن برای اهدافی چندگانه از قبیل استخراج، حفاری و اهداف اقیانوس‌شناسی و حتی عملیات در سطح آب مثل ذخیره و تخلیه نفت یا سکونت و بارگیری بهره برد.

مهار- مهار سکوی اسپار در محل حفاری از طریق ترکیب چندتایی از خطوط مهار زنجیری است که از یک طرف به بدنه در نزدیکی مرکز پیچ سازه(fairlead) و از طرف دیگر به بستر لنگر می‌شود. حرکت سازه اسپار کم است، ولی به‌دلیل اینکه این سازه به‌صورت یک استوانه عمودی، مغروق است و مرکز جرم سکو در بخش میانی آبخور قرار گرفته، حرکت پیچ سازه اهمیت بالایی دارد و یکی از دلایل استفاده از سیستم مهار زنجیری در سازه‌های مشابه همین امر است. علاوه بر این، مرکز پیچ به این دلیل که کمترین نیروهای هیدرودینامیکی را دارد، به عنوان محل اتصال انتخاب می‌شود. بهتر است این نقطه به مرکز جرم سازه نزدیک باشد. سیستم‌های مهار بین ۶ تا ۲۰ خط مهار دارند و از آنجایی که حرکت اسپار کم است برای کاهش هزینه‌ها می‌توان از مهار منقطع (truncated) استفاده کرد.

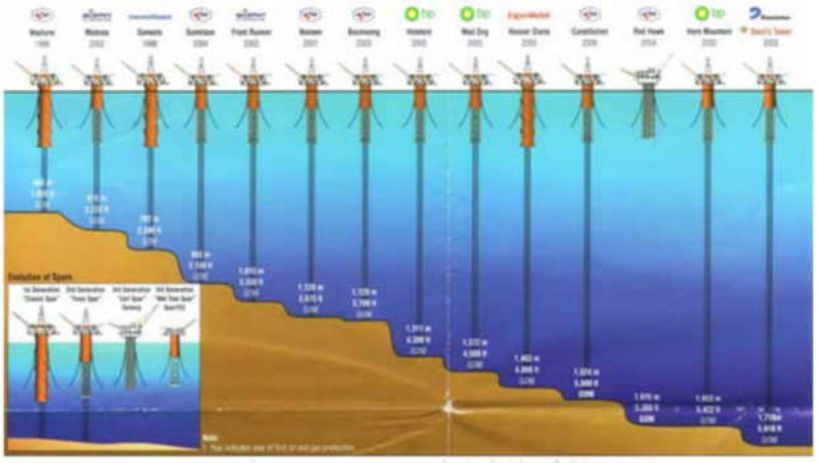
رایزر- رایزرها به‌صورت تقریبا صلب در نظر گرفته می‌شود و غالبا از جنس فولاد ساخته می‌شود. در رایزرها بیشترین تنش در محل کیل و محل اتصال رایزر به بستر وجود دارد و بیشترین خمش در فاصله ۴-۸ درصد عمق آب از دو انتهای رایزر وارد می‌شود.

اسپار خرپایی

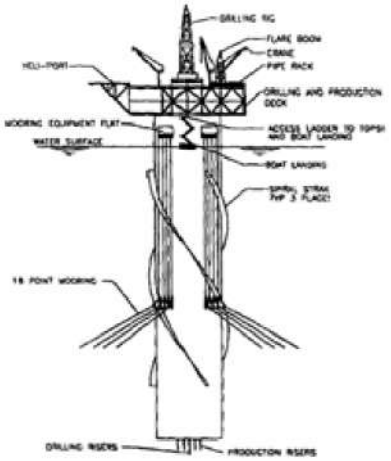
در نوع خرپایی، بخشی از استوانه با خرپا جایگزین شده است. از نظر هزینه، نوع خرپایی بر کلاسیک ترجیح دارد. انواع سکوهای اسپار در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

سکوی اسپار خرپایی اولین بار توسط شرکت Kerr-McGee در سال ۲۰۰۱ با نصب اولین سکوی خرپایی با نام Nansen در خلیج مکزیک معرفی شد. تفاوت این سکو با اسپار کلاسیک در بخش میانی بدنه است

شکل ۴ - سکوهای اسپار نصب شده (عمق ۵۸۰ متر تا ۱۸۰۰ متر)



شکل ۵ - شمای اسپار کلاسیک



شکل ۶ - اسپار خرپایی Perdido

که به جای یک سیلندر از یک سازه خرپایی استفاده شده تا علاوه بر کاهش درگ و ارتقای سطح پایداری، هزینه ساخت را نیز کاهش بدهد. اجزای اصلی سازه شامل تانک بزرگ، مقطع خرپایی و تانک کوچک است. مقطع خرپایی بین دو تانک بزرگ و کوچک قرار دارد و توسط صفحات هیو سازه را پشتیبانی می‌کند. تانک کوچک در کیل قرار دارد که علاوه بر ایجاد بالاست، محل ورودی و خروجی سیستم حفاری است.

■ اسپار سلولی

اسپار سلولی توسط MaGee-Kerr برای اولین و تنها بار با ساخت سکوی RedHawk طراحی و معرفی شد. این سکو اولین بار در سال ۲۰۰۴ در خلیج مکزیک نصب شده است. این اسپار مشابه اسپار کلاسیک است، با این تفاوت که بخش مغروق استوانه‌ای آن شامل یک سیلندر مرکزی است که توسط چند سیلندر دیگر احاطه شده است. مثلا در سکوی REdhawk، ۶ سیلندر مشابه سیلندر هفتم را احاطه می‌کند. این سیلندرها توسط صفحات هیو به هم متصل می‌شوند. شایان ذکر است که هر یک از این سیلندرها دارای ذخیره بویانسی مجزایی جهت ایجاد بالاست در سازه هستند. این نوع در مقایسه با حالت تک استوانه‌ای از نظر اقتصادی و ساخت، مناسب‌تر است. در شکل ۴ سکوهای اسپار نصب شده در عمق ۵۸۰ متر تا ۱۸۰۰ متر نشان داده شده است.

شکل ۷- اسپار سلول- خرپایی

■ اسپار سلولی- خرپایی

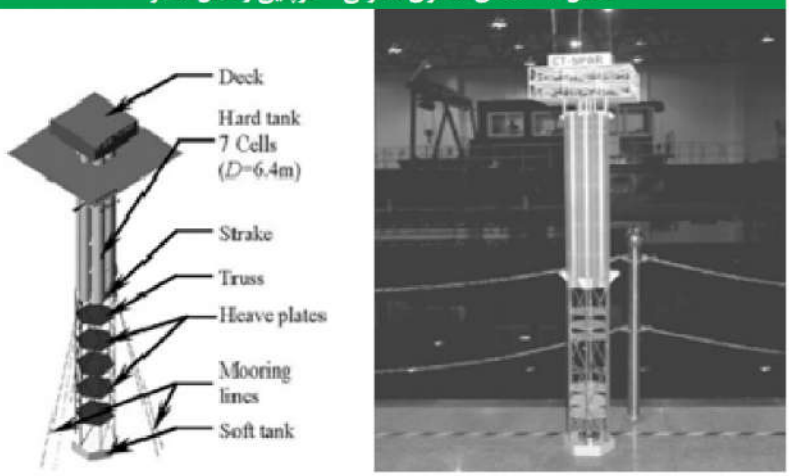
برای بهینه‌سازی هزینه‌های سکو، با ادغام سکوی سلولی و خرپایی این سکو طراحی شده است. آقای ژانگ برای اولین بار این سکو را تحلیل کرد و با ساخت مدل آزمایشگاهی، نتایج تجربی و عددی این اسپار را مورد تحلیل قرار داد که نتایج دارای مقبولیت و تطابق خوبی است.

از دیگر انواع سکوی اسپار که مدل آن ساخته و مورد بررسی و تحلیل واقع شده، اسپار هندسی است. در شکل زیر نمای این سکو آورده شده است.

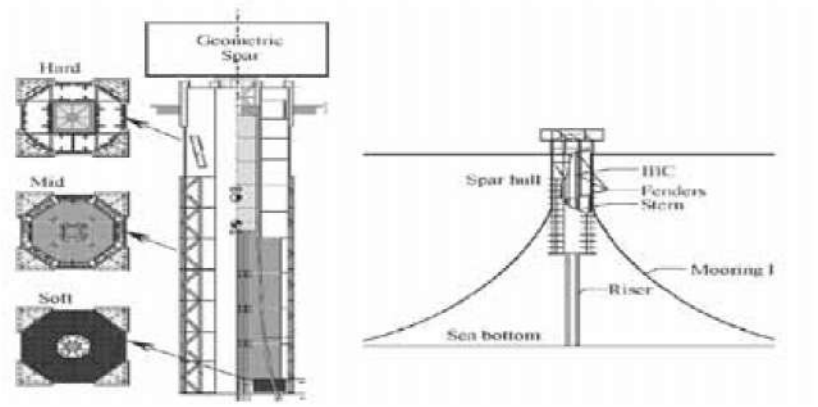
■ برخی کارهای انجام شده در زمینه تحلیل اسپار

در جدول (۱) خلاصه‌ای از کارهای انجام شده پیرامون اسپار ذکر شده است.

شکل ۸- شمای سکوی سلولی- خرپایی و مدل سکو



شکل ۹ - طرح کلی اسپار



جدول ۱ – مهم‌ترین کارهای انجام شده پیرامون اسپار

ردیف	محقق	سال	عنوان تحقیق	خلاصه تحقیق
1	Granville	1991	Neptune project: Spar history and design considerations.	کلیات ساخت و نصب اسپار را به عنوان سازه‌ای انعطاف‌پذیر و اقتصادی برای عملیات پیش‌حفاری و حفاری مناسب معرفی کرد.
2	Mekha	1995 1996	Nonlinear response of a spar in deep water: different hydrodynamic and structural models. Effect of second order diffraction forces on the global response of spars.	اسپار را با ۳ درجه آزادی هیو، سرج و پیچ مدل کرد. C ثابت در معادله موریسون و در تئوری تفرق نیروی اینرسی سازه را به‌دست آورده و نیروی درگ را با در نظر گرفتن ترم غیرخطی معادله موریسون محاسبه کرده است. آنالیز در حوزه زمان صورت گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن C_D ثابت یا وابسته به فرکانس نتایج مشابهی دارد و گرفتن $C_m = 2$ برای اسپار مناسب است. با در نظر گرفتن C متناظر با فرکانس بر اساس تئوری تفرق نیروی اینرسی را به‌دست آورد. در این بررسی تمام ترم‌های غیرخطی اصلاح شده در معادله موریسون جهت در نظر گرفتن اثر تفرق لحاظ شده است.
3	Ran & Kim	1996	Nonlinear coupled response of a tethered spar platform in waves	پارامترهای پاسخ اسپار مهار شده تحت موج منظم و نامنظم را مطالعه کردند. اسپار و مهار را به‌صورت یک سیستم یکپارچه در برنامه کامپیوتری مدل کردند. با آنالیز درگیر حرکات غیرخطی سکو در حوزه زمان، رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه را بررسی کردند.
4	Fischer	1998	Some observations on the heave behaviour of spar platforms.	پارامتر هیو سازه اسپار را با بررسی مدل تست تحت موج حوضچه کشش و با شبیه‌سازی عددی و ترکیب هر دو روش به همراه آنالیز خروجی‌ها، ارائه کردند. عملکرد هیو اسپار و اسپار کوچک امتحان شد و پتانسیل بالای اسپار در حرکت هیو شایان می‌گردد.
5	Ye	1998	Effect of wave directionality on wave loads and dynamic response of a spar.	پاسخ اسپار را تحت دو موج directional hybrid wave model(UHWM unidirectional)& و DHWM بررسی کرد. مقایسه نتایج عددی حاصل از این دو موج نشان داد که پاسخ سرج در موج DHWM کوچک‌تر از موج UHWM است و پاسخ هیو در هر دو مدل یکسان است.
6	Chitrapu	1998 1999	Time domain simulation of spar platform response in random waves and current. Motion response of spar platform in directional waves and current.	پاسخ غیرخطی سکوی اسپار را در شرایط محیطی مختلف شامل موج منظم، موج بی‌کروماتیک، موج تصادفی و جریان در حوزه زمان مدل کرده است. این مدل چند اثر غیرخطی را درنظر می‌گیرد. نیرو و گشتاورها توسط معادله موریسون محاسبه شده است. (محاسبه پاسخ غیرخطی اسپار مهار شده توسط ران در همین سال بدون وجود جریان در موج تصادفی در دو حوزه فرکانس و زمان حل شده است.) نیروی مرتبه اول و دوم موج، جرم افزوده، میرایی راندگی موج، میرایی تابش موج توسط نرم‌افزارWINTCOL محاسبه شده است. پاسخ حرکت اسپار با قطر زیاد را در موج بلند و DHWM به‌طور تصادفی و با در نظر گرفتن جریان در حوزه زمان شبیه‌سازی کرد. ترم‌های غیرخطی معادلات حرکت، برهم‌کنش موج و جریان، نیروهای سطح آزاد و نیروهای جابه‌جایی در این تحقیق بررسی شده‌اند. جهت موج و اندرکنش موج و جریان از جمله عواملی بودند که بر پاسخ سرج و پیچ تاثیر شایانی دارند.
7	M.J. Downie	2000	An experimental investigation of motion control devices for truss spars.	این تحقیق به‌صورت تجربی بر روی یک مدل اسپار تحت موج منظم و نامنظم انجام گرفته است. تحلیل بر اساس نیرو و حرکت عمودی سازه بررسی شده است. هر ستون مدل توسط صفحه افقی، کنترل می‌شود. جهت ثبت رفتار دو صفحه به‌صورت صلب(solid) و دو صفحه به‌صورت مشبک(perforated) مورد آزمایش قرار می‌گیرد و ضرایب نیرو در جهت عمود و عملکرد صفحات ارائه شده است.
8	Chen X& Zhang J	2001	On dynamic coupling effects between a spar and its mooring lines.	اثر درگیری اسپار با خط مهار را تحلیل دینامیکی کرده است. در این تحقیق اسپار در عمق‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، تحلیل دینامیکی درگیر و نیمه‌استاتیکی سازه ارائه می‌شود. اثر کشش مهارها و میرایی مهارها بر حرکت سرج و پیچ سازه بررسی شده است. همچنین پاسخ سازه و مهار در فرکانس‌های مختلف موج و عمق‌های متفاوت بررسی می‌شود. این نتایج در تخمین خستگی و عمر مفید سازه اهمیت دارد.

جدول ۱ – مهم‌ترین کارهای انجام شده پیرامون اسپار

ردیف	محقق	سال	عنوان تحقیق	خلاصه تحقیق
9	Ma & Patel	2001	On the non-linear forces acting on a floating spar platform on ocean waves.	هدف این تحقیق بررسی برهم کنش موج و سازه و رفتاردینامیکی غیرخطی اسپار است. در این تحقیق موج غیرمنظم اقیانوس به سازه اعمال می‌شود. از آنجایی که با افزایش عمق در اقیانوس، آبخور سازه اسپار نیز زیاد می‌شود در اینجا سازه را با آبخور زیاد و غیرخطی بررسی می‌کنند.
10	Agarwal & Jain	2002 2003	Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves. Non-linear coupled dynamic response of offshore Spar platforms under regular sea waves.	به بررسی رفتار غیرخطی سکوی شناور اسپار کلاسیک، تحت موج منظم پرداختند. در این تحقیق با در نظر گرفتن حرکت افقی سکو، پاسخ سکو را با در نظر گرفتن درگیری خطوط مهار در تحلیل، بررسی می‌کنند. به بررسی رفتار غیرخطی سکوی شناور اسپار کلاسیک، تحت موج منظم پرداختند. در این تحقیق با در نظر گرفتن حرکت افقی و عمودی سکو به‌طور همزمان، پاسخ سکو را با در نظر گرفتن درگیری(couple) خطوط مهار در تحلیل، بررسی کرده‌اند.
11	Koo & Kim & Randal	2004	Mathieuinstability of a spar platform with mooring and risers.	ناپایداری متیو در سکوی اسپار را بررسی کردند. ناپایداری متیو حالت خاصی از پدیده تشدید(lock in) است که در حرکت پیچ سازه تحت تاثیر حرکت هیو اتفاق می‌افتد. در ادامه به بررسی اثر رایزرها، خطوط مهار ، اثر میرایی و ارتفاع موج پرداخته شده است. برای بررسی درگیری مهار و رایزر از معادله تغییر یافته متیو استفاده شده است.
12	Wang Ying & Yang Jian-min	2007	Theoretical research on hydrodynamics of a geometric spar in frequency and time domain.	به بررسی تئوری رفتار اسپار هندسی(Geometric spar) در حوزه زمان و حوزه فرکانس و مقایسه نتایج محاسباتی با خروجی حاصل از تست مدل پرداختند. در این تحقیق به بررسی اثر متقابل خطوط مهار و رایزرها با بدنه اسپار پرداخته می‌شود، همچنین بر پایه روش المان مرزی یک پنل سه‌بعدی به همراه سطح آزاد آب توسط نرم‌افزار SESAM مدل‌سازی شده است تا بتوان نیروی مرتبه اول و دوم موج و دیگر ضرایب هیدرودینامیکی سازه را به‌دست آورد.
13	Zhang Fan &.	2008	Numerical investigation on the hydrodynamics of a new spar concept.	به بررسی نتایج حوزه زمان و فرکانس با آنالیز حاصل از تست مدل برای یک اسپار سلولی پرداخته‌اند. در این تحقیق اثر بر همکنش مهار و رایزر در پاسخ سازه در نظر گرفته شده است. برای اسپار، درگیری خطوط مهار و رایزر با سازه، سبب کاهش میزان پیک حرکت در پاسخ سازه می‌شود.
14	Low & Langly	2008	A hybrid time/frequency domain approach for efficient coupled analysis vessel/mooring/riser dynamics.	هم در حوزه زمان و هم فرکانس اثرات بدنه، مهار و رایزرها را به‌طور همزمان، بر پاسخ اسپار تحلیل کردند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد بررسی سازه در حوزه زمان به‌صورت fully-coupled بهترین نتایج را به‌خصوص در آب‌های نیمه‌عمیق ارائه می‌دهد.
15	Kim	2008	Coupled-dynamic analysis of floating structures with polyester mooring lines.	با استفاده از خطوط مهار پلی‌استری به بررسی تئوری و عددی آنالیز دینامیکی سازه‌های شناور در آب عمیق به‌صورت couple پرداخته است. در این تحقیق رابطه تنش و کرنش برای مهارهای پلی‌استر به‌صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است.
16	M. Yang	2011	Coupled dynamic analysis for wave interaction with a truss spar and its mooring line/riser system in time-domain.	به آنالیز اندرکنش موج و سازه اسپار خرپایی و تحلیل دینامیکی مهار، رایزر و سازه در حوزه زمان پرداخته شده است. در این تحقیق، آنالیز در حوزه زمان به‌صورت fully-couple برای سازه‌های فراساحلی مدنظر قرارگرفته است. برای بارهای هیدرودینامیکی از روش مرتبه دوم حوزه زمان استفاده شده است.
17	Aichun Feng	2012	Hydrodynamic Evaluation for Spar Platform Subjected to Mooring Line Failure	به بررسی رفتار دینامیکی سازه هنگام گسیختگی خطوط مهار پرداختند. در این مقاله تغییر پاسخ سازه در اثر این گسیختگی بررسی و رفتار سازه تحت بارهای بحرانی بر خطوط مهار و با مقایسه نتایج استاتیکی و پاسخ طیف و ظرفیت مهار ارزیابی می‌شود. این تحقیق نشان می‌دهد تغییر رفتار سازه با شکست مهارها در حرکات مختلف سازه و شرایط مختلف محیطی بسیار شایان است و پاسخ سازه به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

اسپارهای ساخته شده در جهان

در زیر بـه معرفی جزئیـات مختصری از اسپارهای ساخته شده در نقاط مختلف جهان می‌پردازیم.

اسپار Nepton

این اسـپار اولین سـکوی ساخته شده در جهان اسـت که به منظور اسـتخراج نفت در خلیج مکزیک نصب شـد. ظرفیت این سـکو ۱۴۰۰۰bbl نفت خـام و ۲۳Mmcf/d گاز طبیعی است. این سـکو جزو سکوهای اسپار کلاسـیک محسـوب می‌شـود. دارای دیواره مرکزی(Center wall) با ابعاد ۹,۷۵*۹,۷۵ متر است که بخش اصلی قسمت مغروق سکو را تشـکیل می‌دهد. دارای دو عرشه است که به‌صورت یکپارچه بر بدنه سـوار شـده است. کنترل و مهار سکو از شش نقطه توسط مهارهای زنجیـری (Catenary mooring line) انجام می‌پذیرد. هر مهار شامل بخش زنجیری به طول ۳۲۰متر متصل به بدنه، کابل سیمی به طـول ۷۳۲ متر و یک بخـش کوتاه تحت عنوان Driven pile است که به عنوان لنگر بر بستر دریا می‌خوابد.

اسپار Genesis

این اسـپار اولین اسپار حفاری و استخراج در حوزه نفتـی GENESIS در ۱۵۰ مایلی نیو اورلئان و دومین سـکوی اسپار در جهان اسـت. ایـن اسـپار دارای چهـار بخش کلی است:بدنه، سیستم مهار، رایزر و عرشه فوقانی.

این اسـپار از اسـپار نپتون بزرگ‌تر بوده و دارای طول شـناوری مشـابه نپتون(۹۰متر) ولـی بـا آبخـور و فریبـورد بزرگ‌تر اسـت. سیستم حفاری این اسپار امکان نفوذ تا عمق ۷۶۲۲ متـر را دارد. ظرفیت این سـکو معادل ۵۵۰۰۰bbl نفت و ۲,۰۴Mmcf/d گاز است.

اسپار Diana

این اسـپار متعلق به شرکت EXXON بوده و در ۱۵۰ مایلی از ساحل Galveston در خلیج مکزیک بـرای انجام عملیات کامل حفاری و اسـتخراج نفت نصب شـده اسـت. سـکو دارای طـول مغـروق ۱۰۶,۷متـر و فریبورد و آبخور مشـابه سـکوی جنسـیس است. ظرفیت سـکو معادل ۱۱۰Mbopd و ۳۲۵Mmscfpd است.

اسپار Gummison

این اسپار در Garden Banks در بلوک ۶۶۸ خلیج مکزیک نصب شده است. سیستم حفاری سـکو امکان نفوذ تا عمق ۵۱۸۳ متر را فراهم کرده اسـت. برای حفاری از سـکوی نیمه‌شـناور Noble Amos Rumer استفاده می‌شود. این سکو در سال ۲۰۰۳ در حوزه نفتی مشترک با اسپارهای Nansen و Boomwang نصب شد.

اسپار Holestein

ایـن اسـپار در Green Canyon واقع در بلوک ۶۴۵ در خلیج مکزیک نصب شـده اسـت و جزو بزرگ‌ترین سکوهای خرپایی در جهان محسوب می‌شـود. خط مهار این سکو متشـکل از زنجیر، کابل و لوله به عنوان لنگر است. سیستم حفاری سکو امکان نفوذ تا عمق ۷۶۲۲متر را فراهم می‌کند. سازه اسپار دارای Hard-tank به طـول ۸۹ متر و جابه‌جایی ۱۵۵۰۰تن اسـت. ظرفیت استخراج این سکو برای نفت ۱۱۰۰۰b/d و ۴,۲۵Mmcm/g برای گاز است.

اسپار Mad dog

این اسپار در منطقه نفتی Holestein در بلـوک ۷۸۲ با ظرفیـت ۱۰۰۰۰b/d نفت و ۱,۷Mmcf/d گاز مورد بهره‌برداری قـرار گرفته اسـت. این سـکو از تجهیزات کامل حفاری و اسـتخراج بهـره می‌گیرد. همچنیـن دارای Dry trees در طـول و ۱۶ حلقه چاه (Well slop) اسـت و با در اختیـار داشـتن Hard-tank با ظرفیت جابه‌جایـی ۱۸۰۰۰تن، امکان نصب مته و تجهیزات حفاری و اسـکان ۱۲۶ خدمه را فراهم می‌کند.

اسپار Nansen

این سکو که در سال ۲۰۰۱ معرفی شد، در

جدول ۲ - اسپارهای ساخته شده در جهان

Type of Spar	Water depth (m)	Location	Capacity		Hull (m)
			bbl/d of oil	MMcf/d of gas (MMcm/d)	D=Diameter L=Length
Neptune	600	Viosca Knoll Block 826; Gulf of Mexico	14,000	23 (0.65)	L=215, D= 22
Genesis	790	Green Canyon blocks 160, 161 and 205; Gulf of Mexico	55,000	72 (2.04)	L=215, D=37.20
Exxon's Diana	1448	East Breaks Block 945, 946 and 989; Gulf of Mexico	110,000	325 (9.21)	L=215, D=37.2
Nanseen truss	1130	East Breaks block 601, 602,646; Gulf of Mexico	40,000	200 (5.67)	L=165.5, D=27.4
Boomvang truss	1052	East Breaks block 643; Gulf of Mexico	40,000	200 (5.67)	L=165.5, D=27.4
Horn Mountain	1646	Mississippi Canyon Block 126,127; Gulf of Mexico	65,000	68 (1.93)	L=178.4, D=32.3
Gunnison	952	Garden Banks Block 668; Gulf of Mexico	40,000	200 (5.67)	L=165.5, D=27.4
Holstein	1325	Green Canyon Block 645; Gulf of Mexico	110,000	150 (4.25)	L=227, D=46
Mad Dog	1372	Green Canyon Block 782; Gulf of Mexico	100,000	60 (1.7)	L=169.2, D=39
Red Hawk	1616	Garden Banks Block 877; Gulf of Mexico	-	300 (8.5)	L=146.4, D=19.5
Constitution	1555	Green Canyon Block 680; Gulf of Mexico	70,000	200 (5.67)	L=167.7, D=29.9

عمق ۳۶۸۰ متری خلیج مکزیک واقع شده و اولین سکوی اسپار خرپایی است. ظرفیت این سکو ۴۰۰۰۰bbl نفت و ۵٫۶۷Mmcm/d گاز است. بخش فوقانی سکو دارای وزن ۸۷۵۰ تن با بدنه ۱۲۰۰۰تنی است که توسط ۹ خط مهار کنترل می‌شود.

اسپار Boomwang

اسپار خرپایی Boomwang کاملا مشابه اسپار Nansen است که در بلوک ۶۴۳ خلیج مکزیک نصب شده است.

اسپار Horn Mountaine

این اسپار در می سی سی پی در بلوک ۱۲۶ و ۱۲۷ خلیج مکزیک واقع شده است. بدنه و بخش مغروق آن از فنلاند به همراه عرشه و تجهیزات استخراج و حفاری سفارش داده شده است. خط مهار سازه شامل دو بخش زنجیر است که ازطریق کابل پلی‌استری به هم متصل می‌شوند و مهار سازه را تشکیل می‌دهند و در مجموع دارای ۱۱ مهار است. ظرفیت این اسپار ۶۵۰۰۰ bbl نفت در سال ۲۰۰۳ و ۱٫۹۳Mmcm/d گاز بوده که پیش‌بینی شده تا ۱۵۰ MMboe برسد. این اسپار به عنوان عمیق‌ترین سازه شناور Dry tree در جهان تلقی می‌شود.

اسپار Red Hawk

این اسپار اولین اسپار سلول- خرپایی است که در Garden Banks و در بلوک ۸۷۷ در خلیج مکزیک در عمق ۱۶۱۶متر نصب شده است. طراحی این اسپار برای ظرفیتی معادل ۸٫۵Mmcm/d و به عنوان یک سکوی مرکزی برای توسعه حوزه نفتی پیرامون است. سازه اسپار

جدول ۳ - سکوهای دهه اخیر در خلیج مکزیک

Gulf of Mexico

No	Country	Development Area	Production System	Depth (m)	Year	Operator
1	US	Atlantis	Semi	1900	2006	BP
2	US	water valley	Semi	2480	2007	Anadarko
3	US	Constitution	Spar	1550	2006	Kerr McGee
4	US	Devils Tower	Spar	1740	2004	Dominion
5	US	Front Runner	Spar	1100	2004	Murphy
6	US	Gomez	Semi	930	2005	ATP
7	US	Holstein	Spar	1330	2004	BP
8	US	Mad Dog	Spar	1370	2005	BP
9	US	Magnolia	TLP	1450	2004	ConocoPhillips
10	US	Marco polo	TLP	1335	2004	Anadarko
11	US	Neptune	TLP	1860	2007	BHP
12	US	Red Hawk	Spar	1640	2004	Kerr-McGee
13	US	Tahiti	Spar	1240	2007	Chevron Texaco

شامل شش استوانه قائم است که استوانه هفتم را احاطه می‌کند. این هفت استوانه توسط صفحات هیو متصل هستند و لازم به ذکر است که هر سیلندر ذخیره بالاست مجزا دارد. بخش خرپا مشابه سازه اسپار خرپایی است و خطوط مهار این اسپار از مواد مرکب پلی‌استری ساخته شده است.

اسپار Constitution

این اسپار در بلوک ۶۸۰ در Green Canyon خلیج مکزیک نصب شده است. این سکو به منظور تولید نفت و گاز است. عملیات حفاری ازطریق سکوی نیمه‌شناور Noble Amos Ramos انجام می‌شود. ظرفیت این سکو ۷۰۰۰۰bbl و ۵۶۷Mmcm/d است.

اسپار Perdido

این اسپار جدیدترین اسپار ساخته شده ازسوی شرکت Shell است که به عنوان یک رکورد در سازه‌های آب عمیق در سال ۲۰۱۰ محسوب می‌شود.از جمله ویژگی‌های این سازه می‌توان به طراحی صفحات هیو و کنترل پاسخ سازه اشاره داشت، به‌طوری که سکو را دارای پایداری منحصری کرده است. از ویژگی‌های دیگر سازه به‌کارگیری المان‌های لوله‌ای در بخش بالاست و خرپای سازه جهت بهینه سازی و شناوری بهتر سکو است که در شکل۶ مشاهده می‌شود.

برخی از شرکت‌های فعال در این زمینه عبارتنداز: ESSCO سازنده اسپار ORYX، BRENT سازنده اسپار NEPTON ،CHEVRON سازنده اسپار GENESIS ،EXXON سازنده DIANA در خلیج مکزیک و دریای شمال است.

جدول (۳) سکوهای ساخته شده در خلیج مکزیک را معرفی کرده و در ادامه مقایسه‌ای بین سکوی اسپار و سایر سکوهای ساخته شده ارائه می‌شود. همان طور که در جدول می‌بینیم از ۱۳ پروژه اخیر فراساحلی در خلیج مکزیک هفت سکوی اسپار با عمق متوسط ۱۴۲۵ متر و سه سکوی پایه‌کششی با عمق متوسط ۱۵۰۰ متر است، البته گفتنی است که در دهه ۹۰ تنها یک سکوی اسپار ساخته شده، ولی بالغ بر هشت سکوی پایه کششی بهره‌برداری شده و سکوهای semi-submersible نیز سه پروژه با عمق متوسط ۱۷۷۰ را شامل می‌شود.

نتایج

مقاله حاضر با هدف آشنایی و معرفی سکوی اسپار، نوشته شده است. این تحقیق به معرفی تاریخچه سکوی اسپار و سیر تکاملی این سکو در صنایع فراساحلی می‌پردازد تا خواننده با اهمیت و دلایل به‌کارگیری این سکو آشنا شود. در ادامه پیکربندی سازه سکو و انواع سکوهای به‌کار گرفته شده تاکنون معرفی شده است. کارهای تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شده در جدول۱ به‌طور خلاصه آمده است. در نهایت این تحقیق به معرفی سکوهای اسپار ساخته شده می‌پردازد تا اهمیت و کارایی این سکوها در دهه اخیر برای خواننده ملموس شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با ویژگی‌های اسپار آشنا شدیم. دیدیم که صنایع فراساحل در دنیا در زمینه استخراج آب‌های عمیق توجه خاصی به سکوی اسپار کرده و در یک دهه گذشته با انجام تحقیقات و آزمایشات متنوع پیرامون این سازه انواع پیکربندی این سازه را ساخته و در حال توسعه آن است. امروز اسپار به عنوان یک سکوی تطبیقی قابل رقابت با سکوهای تطبیقی مانند سکوی پایه‌کششی، کاملا شناخته شده است و به عنوان یک سکوی اقتصادی و پایدار جایگاه ویژه‌ای در بین سکوهای آب عمیق دارد. با توجه به منابع نفتی موجود در دریای خزر لازم است ما نیز خود را برای مجهز کردن به دانش لازم برای به‌کار گیری این سکو آماده کنیم.

منابع و مراجع این مقاله در دفتر نشریه موجود است.

* استادیار، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ tabeshpour@sharif.edu
** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
*** استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشگاه صنعتی شریف