

## مروری بر مدل‌سازی سکوه‌های آب عمیق و روند ساخت مدل سکوی اسپار

حمیدرضا قیصری<sup>۱</sup>، محمدرضا تابش‌پور<sup>۲</sup>، محمدسعید سیف<sup>۳</sup>\*

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

### چکیده

نفت به عنوان اصلی‌ترین منبع تولید انرژی در جهان مطرح می‌باشد و از این رو اکتشاف و استخراج آن از دل زمین یا دریا از اهمیت بالایی برخوردار است. بسیاری از این منابع در اعماق دریا وجود دارند و استخراج این منابع مستلزم دستیابی به دانش طراحی و تکنولوژی ساخت سکوها و ادوات استخراج در آب‌های عمیق می‌باشد. حجم عظیمی از ذخایر نفتی، در بستر آب‌های عمیق وجود دارد. اسپار یک سکوی شناور قابل رقابت برای آب عمیق و خیلی عمیق در استخراج نفت و گاز است. ساخت سکوه‌های آب عمیق نیازمند بررسی و صرف هزینه و زمان زیادی برای انجام محاسبات و پیش‌بینی‌های لازم می‌باشد نرم افزارهای مختلفی برای انجام محاسبات هیدرودینامیکی و ساخت مدل عددی موجود می‌باشد که در موارد زیادی کاربردی بوده و نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند. با این حال به دلیل بزرگ بودن سازه و شرایط محیطی که سبب غیر خطی شدن اغلب پارامترها از جمله سختی مهارها و پارامترهای هیدرودینامیکی می‌شود اکتفا نمودن به نتایج عددی نرم افزارها هیدرودینامیکی کار معقولی نبوده و انجام تست آزمایشگاهی و ساخت مدل ضروری می‌باشد. در این مقاله مروری بر روند مدل‌سازی سکوه‌های آب عمیق می‌کنیم و سپس نحوه ساخت و مراحل ساخت سکوی اسپار بیان می‌گردد.  
کلمات کلیدی: مدل‌سازی، سکوی اسپار، تحلیل تجربی اسپار.

### مقدمه

اولین اسپارهای ساخته شده در جهان با هدف استخراج نفت و منابع نفتی نبودند. از جمله سکوه‌های ساخته شده می‌توان اسپار نیپون را نام برد که در سال ۱۹۶۰ در ساحل ژاپن با ۱۴۹ متر طول با قطر متغییر ۳ تا ۶/۵ متر برای اهداف اقیانوس شناسی نصب گردید. در زمینه تحلیل هیدرودینامیکی سکوی اسپار و آنالیز تجربی مدل، کارهای زیادی پیرامون تحلیل حرکت اسپار، خطوط مهار و اثر رایزرها از تحلیل ریاضی و فرموله کردن حرکت و بررسی نیروها بصورت تحلیلی و خطی و بررسی غیر خطی سازه و اثر درگیری بخش‌های مختلف تا مدل‌سازی انواع سکوه‌های اسپار و انجام تست‌های آزمایشگاهی بر روی مدل‌ها صورت گرفته است [3]. داوونی و همکارانش [4] در سال ۲۰۰۰ به صورت تجربی حرکت اسپار خریایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این تحقیق بصورت تجربی بر روی یک مدل اسپار تحت موج منظم و نامنظم انجام شد. تحلیل بر اساس نیرو و حرکت در راستای عمودی انجام شد. ژانگ فن و همکاران [4] در سال ۲۰۰۸ 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. تحقیقات فوق و سایر مطالعات حاکی از رفتار مناسب سکوی اسپار نسبت به سایر سکوه‌های آب عمیق و کارایی مناسب این سکو می‌باشد. مدل‌سازی تجربی یکی از بخش‌های اصلی در ساخت، امکان‌سنجی، تحلیل و صحت‌سنجی نتایج عددی در پروژه‌های صنعتی علی‌الخصوص صنایع فراساحل می‌باشد. مطالعه مدل امکان مشاهده عینی جریان را فراهم می‌کند و با انجام آزمایش بر روی مدل می‌توان اطلاعات عددی خاص بدست آورد. مثلاً می

توان عمق جریان را بدست آورد، توزیع سرعت را مشخص کرد، توزیع فشار و نیروهای وارده را اندازه گیری کرد و در نتیجه می توان نتایج را تعمیم داد.

بخش لاینفک تست تجربی اصول تشابه می باشد که در هر تست آزمایشگاهی باتوجه به شرایط محیطی و ابعاد سازه برقرار می باشد. اصول تشابه را می توان با پارامترهای بی بعد بیان نمود. با استفاده از پارامتر های بی بعد می توان نتایج آزمایش را عمومیت داده، آن ها را برای وضعیت هایی با ابعاد فیزیکی متفاوت و اغلب برای وضعیت هایی با خواص سیال متفاوت نیز به کار برد.

### اصول تشابه

برای برقراری تشابه بین مدل و نمونه واقعی سه تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی باید برقرار شود. تشابه هندسی شامل تشابه ابعاد فیزیکی شامل طول، عرض، قطر و حتی ارتفاع زبری سطح مدل و نمونه می باشد. برقراری تشابه سینماتیکی برمی گردد به برقراری تشابه بین خطوط جریان در مدل و نمونه واقعی و تشابه دینامیکی عبارت است از تشابه بین مقدار و جهت نیرو در نمونه اصلی و مدل. بنابراین برای برقراری کامل تشابه دینامیک باید عدد ماخ، عدد رینولدز، عدد فرود و عدد وبر در مدل و نمونه یکسان باشند. عموماً تحقق کامل این شرایط غیر ممکن است مگر آن که مقیاس یک به یک باشد و بررسی در ابعاد واقعی صورت پذیرد. اما خوشبختانه در بسیاری از وضعیت ها و پدیده های مرتبط با سازه های دریایی تنها دو نیروی مهم فرود و رینولدز وجود دارد. در تست های هیدرودینامیکی با توجه به شرایط محیطی و ابعاد سازه برخی نیروها خیلی بزرگتر از برخی نیروهای دیگر می باشد که می توان از نیروی کوچکتر صرف نظر نمود. مثلاً در تست سکوها آب عمیق بدلیل بزرگ بودن ابعاد و ثابت بودن سازه نیروهای گرانشی و اینرسی (بجز حرکت رول) بسیار حائز اهمیت می باشند در تایید تشابه فرود عدد فرود که به شکل زیر تعریف می شود باید بین مدل و سازه در ابعاد اصلی برابر باشد  $u$  و  $L$  به ترتیب سرعت مشخصه و طول می باشد و  $g$  شتاب گرانشی زمین است.

$$\frac{u_p^2}{gD_p} = \frac{u_m^2}{gD_m} \quad (1)$$

که در اینجا اندیس  $p$  و  $m$  به ترتیب برای سازه اصلی<sup>1</sup> و مدل می باشد و  $\lambda$  ضریب تشابه ابعادی در بحث مدل سازی آزمایشگاهی می باشد که

$$\lambda = \frac{L_p}{L_m} \quad (2)$$

. نیروی دیگری که در مدل سازی هیدرودینامیکی حائز اهمیت می باشد نیروی ویسکوز می باشد که در حرکت *roll* سازه های آب عمیق اهمیت پیدا می کند. یکی از مهمترین این نیروها ممان میرایی حرکت رول می باشد. قانون تشابه رینولدز ارتباط صحیح بین نیروی اینرسی و نیروی ویسکوز را بیان می کند که بر پایه آن عدد رینولدز در مدل و مقیاس بزرگ باید برابر باشد.

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (3)$$

$L$  و  $u$  به ترتیب طول و سرعت مشخصه هستند و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی است. پارامتر های  $g$  و  $\nu$  اصولاً در مدل و ابعاد اصلی با هم برابرند. بنا بر این برای تست مدل نمی توان هم زمان مقیاس رینولدز و فرود را با هم برقرار کرد.

در مدل سازی سکوها آب عمیق به دلیل غالب بودن نیروهای اینرسی تشابه فرود اصل قرار می گیرد. بنابراین تشابه رینولدز نقض می گردد. برای کاهش اثر عدم تشابه رینولدز آزمایشات را در اعداد رینولدز بالا انجام می دهند. عدد رینولدز مدل کمتر از عدد رینولدز نمونه واقعی می باشد باین حال عدد رینولدز مدل از مقدار قابل قبولی بزرگتر می باشد. به منظور کاهش اثرات ویسکوز، مقیاس مدل سازی را حدالمقدور بزرگ در نظر می گیریم.

با توجه به رابطه Error! Reference source not found. و برقراری قانون تشابه فرود و برابر گرفتن شتاب جاذبه که در مدل و ابعاد واقعی یکسان است بدست می آید:

<sup>1</sup> prototype

$$u_p = u_m \sqrt{\lambda} \quad (4)$$

در این جا  $u$  سرعت جریان است.

### مقیاس مدلسازی

معیار اصلی در انتخاب مقیاس مدلسازی توانایی سیستم موج ساز در تولید امواج دریا در مقیاس مدلسازی می باشد. حداکثر ارتفاع موج تولیدی در آزمایشگاه که در برنامه تست قرار داده می شود، بالاترین محدوده مقیاس در مدلسازی را تعیین می کند. پهنای فرکانسی یک ژنراتور موج و همینطور توانایی آن برای تولید فرکانس بالا و امواج با طول موج کوچک می تواند در تعیین محدوده مقیاس مدلسازی موثر واقع شود. با کالیبره کردن ژنراتور موج قبل از انجام تست می توان طیف موج مناسب برای تولید موج را با ضریب اطمینان بالایی تولید کرد. سائز فیزیکی مدل نیز در تانک های کشش کوچک حائز اهمیت است زیرا برگشت امواج در تانک های باریک از دیواره ها روی خود مدل تاثیر می گذارد و باعث تاثیر گذاری روی نیروی دریافت و ممان های اندازه گیری شده می شود. به طور کلی هرچه ابعاد مدل نسبت به ابعاد تانک کشش بزرگتر شود این تاثیرات دیواره بیشتر می گردد.

عامل دیگری که در تعیین مقیاس مدلسازی اهمیت دارد نیروی کشش سطحی می باشد. نیروهای کشش سطحی بطور کلی در مقیاس بانبروهای پتانسیل مقیاس شده در تست های عمیق قابل صرف نظر می باشد اما در برخی موارد این عامل برنتایج تست و تعیین مقیاس مدلسازی اثرگذار می باشد. اثر نیروی کشش سطحی در امواج کوچک نمایان می شود. در امواج خیلی کوچک این اثر سبب یک سختی و استحکام در سطح آب می گردد و بصورت یک ترم گرانشی در معادلات پتانسیل موج وارد می گردد. کشش سطحی اصولا در امواج با طول موج کمتر از  $0.1$  متر اثرگذار می باشد. از آنجایی که امواج محیطی برای سکوهاى آب عمیق در ابعاد واقعی با دوره تناوب  $4$  تا  $25$  ثانیه در نظر گرفته می شود، به این نتیجه می رسیم که برای صرف نظر از اثرات کشش سطحی و اصولی بودن نتایج حاصل از شرایط تست مدل نباید ضریب تشابه ابعادی بین مدل و نمونه واقعی در مدلسازی آب عمیق بیشتر از  $\frac{1}{250}$  باشد. غالباً مقیاس مدلسازی در آزمایشگاه ها بین  $\frac{1}{50}$  تا  $\frac{1}{200}$  در نظر گرفته می شود. کشش سطحی اصولا در مدل در جایی تاثیر گذار است که فضاها و تانک های مغروق با ابعاد مشخصاً کوچکتر از  $0.1$  متر وجود داشته باشد. با افزودن مواد شیمیایی نیز می توان این کشش سطحی را در تانک کشش کم نمود.

### تعیین مقیاس مدلسازی برای سکوی اسپار

همان طور که گفتیم مقیاس مدل سازی باید کوچکتر از  $\frac{1}{250}$  نباشد بدلیل عمق کم حوضچه و عدم کارایی سیستم موج ساز در عمق بیشتر از  $1/20$  متر مقیاس مدلسازی را  $\frac{1}{200}$  انتخاب میکنیم. دلیل دیگر این مقیاس زیاد بودن درفت مدل می باشد و در مقیاس های بزرگتر فاصله کیل سکو تا کف حوضچه و همچنین مدلسازی مهارها با محدودیت روبرو می شود.

### قوانین تشابه برای مدلسازی آزمایشگاهی سکوی اسپار

اسپار یک سازه اینرسی غالب می باشد و با توجه به آنچه در بخش قبل بیان کردیم تشابه فرود را به عنوان اصل پایه ای تشابه، در نظر می گیریم. اگر نسبت تشابه هندسی  $\lambda$  باشد خواهیم داشت:

$$L_p = \lambda L_m \quad (5)$$

با توجه به معدهله فوق:

$$u_p = \sqrt{\lambda} u_m \quad (6)$$

برای بدست آوردن جرم مدل از رابطه  $m = \rho v$  بین مدل و نمونه استفاده می شود. اگر نمونه و مدل هردو از یک جنس باشند رابطه جرم نمونه و مدل بصورت زیر می باشد:

$$v_p = \lambda^3 v_m \quad (7)$$

$$m_p = \lambda^3 m_m \quad (8)$$

اما اگر مدل از جنس دیگری باشد تفاوت چگالی باید در رابطه فوق اعمال شود به این صورت که:

$$m_p = \lambda^3 \frac{\rho_m}{\rho_p} m_m \quad (9)$$

در مدل کردن وزن، چون سازه اسپار ساده می باشد، می توان با استفاده از وزنه های اضافه مدل را از ماده ای با چگالی کمتری بسازیم.

در بحث زمان با توجه به رابطه سرعت و زمان و برقراری تشابه فرود می توان ارتباط بین زمان برای مدل و نمونه را به این صورت بیان نمود.

$$u_p = \sqrt{\lambda} u_m \quad (10)$$

$$x_p t_p = \sqrt{\lambda} x_m t_m \quad (11)$$

$$t_p = \sqrt{\lambda} t_m \quad (12)$$

سپس با در نظر گرفتن رابطه سرعت و شتاب:

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} \quad (13)$$

با در نظر گرفتن اصل فرود:

$$\dot{u}_p = \dot{u}_m \quad (14)$$

برای نوشتن تشابه بین نیروهای وارده از سیال برای مدل و نمونه از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{\gamma_p v_p}{\gamma_m v_m} \quad (15)$$

شتاب گرانش را ثابت فرض میکنیم و با در نظر گرفتن نسبت چگالی آب شیرین به آب دریا:

$$F_p = \frac{\lambda^3}{0.975} F_m \quad (16)$$

تنش برابر نیرو تقسیم بر مساحت می باشد که بادر نظر گرفتن نسبت مساحت بین مدل و نمونه می توان نوشت:

$$s_p = \lambda s_m \quad (17)$$

با استفاده از روابط فوق می توان نتایج حاصل از مدل را برای نمونه اصلی تعمیم داد.

### مدل سازی مدول الاستیسیته

در صورتی که مدل دارای صلبیت قابل قبولی باشد و در مقابل نیروهای وارده تغییر شکل نداشته باشد نیازی به مدل کردن مدول الاستیسیته نمی باشد. در مدل سازی قسمت هایی از مدل که غالباً دارای طول زیاد و قطر کم می باشند و در مقابل نیرو و جابجایی دچار کشیدگی یا تغییر شکل می شوند مانند خطوط مهار در اسپار یا تاندون ها در سکوها پایه کششی، در نظر گرفتن رابطه بین مدول نمونه و مدل اهمیت پیدا می کند.

سازه اصلی اسپار بدلیل صلب بودن نیازی به تبدیل مدول الاستیسیته ندارد ولی خطوط مهار چون بعنوان سازه بلند و باریک محسوب می شود و در مقابل نیروی دینامیکی موج تغییر شکل دارد، مدول الاستیسیته باید مدل شود.

برای مدل کردن مدول الاستیسیته از اصل تشابه کوشی استفاده میکنیم. این اصل با در نظر گرفتن رابطه تنش خمشی بین مدل و نمونه، ارتباط مدول مدل و نمونه را بیان می کند.

$$\left(\frac{MY}{EI}\right)_p = \left(\frac{MY}{EI}\right)_m \quad (18)$$

با در نظر گرفتن رابطه نیروی خمشی داریم:

$$M = F d \quad (19)$$

$$M_p = \lambda^4 M_m \quad (20)$$

از آنجایی که  $\lambda$  از جنس طول می باشد.

$$(EI)_p = \lambda^5 (EI)_m \quad (21)$$

$EI$  را می توان سختی مهار دانست.

می دانیم ممان اینرسی از مرتبه ۴ طول می باشد بنابراین داریم:

$$I_p = \lambda^4 I_m \quad (22)$$

و نتیجه میگیریم.

$$E_p = \lambda E_m \quad (23)$$

با توجه به رابطه فوق مدول الاستیسیته مهار که غالباً بصورت محوری در نظر گرفته می شود  $\frac{1}{\lambda}$  مدول اصلی می باشد.

با در نظر گرفتن رابطه پیچش نیز می توان مدول پیچشی مهار را مانند رابطه بالا بدست آورد که نتیجه می شود:

$$G_p = \lambda G_m \quad (24)$$

لازم بذکر است که سازه های دریایی در آب شور نصب و نگهداری میشوند. در حوضچه کشش به جهت جلوگیری از خوردگی، از آب شیرین استفاده می شود. لذا در محاسبه پارامترهای مدل اختلاف چگالی آب شود و شیرین باید لحاظ گردد.

### مطالعه موردی

در این بخش روند مدلسازی سکوی اسپار سلول خرپایی در آزمایشگاه دریا دانشگاه صنعتی شریف بطور خلاصه بیان میشود.

### نمونه اصلی

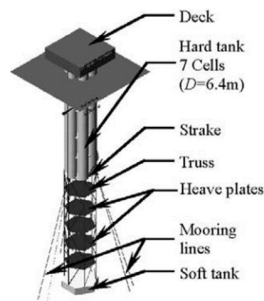
برای شروع مدل سازی، نیاز به یک مدل اصلی داریم. در این پروژه سکوی اسپار سلول خرپایی بعنوان سازه اصلی انتخاب شده است. در جدول ۱ مشخصات نمونه آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای اصلی نمونه اسپار اصلی [۵]

ردیف	پارامترهای کلیدی	مقدار
۱	ارتفاع کلی سکو(متر)	۱۷۰
۲	آبخور(متر)	۱۶۰
۳	قطر اسپار(متر)	۲۰
۴	ارتفاع تانک بزرگ(متر)	۸۵
۵	ارتفاع خرپا(متر)	۸۰
۶	قطر سلول(متر)	۶.۴
۷	فاصله صفحات هیو(متر)	۱۰

۵	ارتفاع تانک کوچک (متر)	۸
۱۷۰۰۰	جابجایی (تن)	۹
۸۶	ارتفاع مرکز ثقل از کیل (متر)	۱۰
۱۰۷	ارتفاع مرکز بویانسی از کیل (متر)	۱۱

مهار این سکو برای عمق ۱۵۰۰ متری توسط سیستم مورینگ کتنری طراحی شده است. سیستم مهار دارای ۹ خط مهار که در سه نقطه با زاویه ۱۲۰ نسبت به یکدیگر، سکو را در محل خود پایدار می کند. نمای شماتیک سکو در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمایی از سکوی اسپار [6]

مدل سازی سکوی آب عمیق به خودی خود حتی با وجود امکانات مناسب امری دشوار و دارای محدودیت می باشد. حال آنکه در آزمایشگاه دریا دانشگاه شریف، ما با مهمترین محدودیت یعنی محدودیت شدید عمق حوضچه مواجه هستیم. حداقل عمق حوضچه مورد نیاز ۶-۷ متر می باشد در صورتی که عمقی که موج ساز کارایی دارد، حداکثر ۱/۲ متر می باشد به همین دلیل باید حداقل ها را در انتخاب مقیاس در نظر بگیریم و از حداکثر امکانات آزمایشگاه بهره ببریم.

### تعیین ابعاد مدل اسپار

با در نظر گرفتن مقیاس  $\frac{1}{200}$  برای مدل و با توجه به جدول ابعاد و سایر پارامترهای مدل را استخراج میکنیم.

$$\text{قطر اسپار مدل} = \frac{\text{قطر اسپار prototype}}{\lambda} = \frac{20\text{m}}{200} = 10\text{cm}$$

$$\text{آبخور اسپار مدل} = \frac{\text{آبخور اسپار prototype}}{\lambda} = \frac{160\text{m}}{200} = 80\text{cm}$$

$$\text{ارتفاع اسپار مدل} = \frac{\text{ارتفاع اسپار prototype}}{\lambda} = \frac{170\text{m}}{200} = 85\text{cm}$$

$$\text{جرم اسپار مدل} = \frac{\text{جرم اسپار prototype}}{\lambda^3} = \frac{17/9 \times 10^6 \text{ kg}}{200^3} = 2/125\text{kg}$$

با توجه به مقادیر متفاوت در مراجع برای نمونه اصلی جرم مدل بین ۲/۱۲۵-۲/۳۷۵ کیلوگرم می باشد.

$$\text{فاصله مرکز ثقل اسپار prototype} = \frac{86\text{m}}{200} = 43\text{cm}$$

$$\text{فاصله مرکز بویانسی اسپار prototype} = \frac{107\text{m}}{200} = 53/5\text{cm}$$

$$\text{نقطه اتصال مهار اسپار prototype} = \frac{90\text{m}}{200} = 45\text{cm}$$

$$\text{قطر سلول اسپار} = \frac{6/4\text{m}}{\lambda} = 3/2\text{cm}$$

$$\text{ارتفاع واقعی سلول} = \frac{85\text{m}}{\lambda} = 42/5\text{cm}$$

$$\text{مدل GM} = k_B + \frac{I}{V} - k_G = 0/014\text{m}$$

### امکان سنجی مواد ساخت

پس از تعیین ابعاد و وزن و حجم مدل ساخت مدل آغاز می گردد. اولین مرحله در ساخت مدل تعیین مواد ساخت می باشد. برای این مهم باید مواد موجود در بازار را شناسایی و وزن مدل را بسته به پیچیدگی هندسی مدل با کمک نرم افزار یا بصورت دستی تخمین بزنیم و سپس جنس بخش های مختلف را بررسی کنیم. از آنجایی که آبخور سکوهاى آب عمیق اهمیت زیادی دارند مواد باید به گونه ای انتخاب شوند که وزن سازه ۱۵ تا ۲۰ درصد کمتر از مقدار پیش بینی شده باشد تا بعد از ساخت بتوانیم با توزیع وزن مرکز ثقل و شعاع ژیراسیون دلخواه را بدست بیاوریم.

از ویژگی های اصلی مواد مورد نیاز وجود یا امکان ساخت پروفیل های متناسب با شکل و ابعاد المان ها ی مدل است. دیگر ویژگی این مواد مقرون بصره بودن تهیه مواد و سادگی ساخت مدل می باشد. هم چنین مواد باید در شرایط حوضچه و رطوبت محیط دارای دوام مناسب باشند. هم چنین باید به امکان رنگ زدن، زیبایی و ماندگاری مدل توجه شود.

باتوجه به موارد فوق برای ساخت مدل می توانیم از لوله های پلیکا، آلومینیوم و برنج استفاده کنیم که باتوجه به هزینه و راحتی ساخت، بدنه اصلی مدل را از پلیکا میسازیم. برای ساخت سلولها از لوله پلیکا با قطر ۳۲ وضخامت ۱/۸ میلیمتر استفاده میکنیم.

برای ساخت بخش خرپا می توانیم از مفتول های مسی و یا آلومینیومی استفاده کنیم که با توجه به وزن و بویانسی خرپا از لوله های آلومینیومی استفاده شده است. برای ساخت صفحات هیو نیاز به جنسی با ضخامت ۳ تا ۵ میلیمتر داریم بصورتی که وزن هر صفحه از ۵۰ گرم بیشتر نشود. همچنین این صفحات باید امکان برش و مته کاری را دارا باشند. برای صفحات هیو از طلق های پلاستیکی استفاده می کنیم. مشخصات این صفحات، تعداد، سطح موثر و فاصله آن ها در منبع [8] موجود می باشد.

### تعیین مرکز جرم و شعاع ژیراسیون

پس از تعیین مواد وزن بخش های مختلف و مرکز جرم هر بخش و وزن کلی مدل و مقدار بویانسی مشخص می باشد. پس از تعیین این مشخصات و اختلاف وزن و بویانسی توزیع وزن در مدل مشخص می گردد. غالباً با انتخاب دوزنه در کیل و عرشه و تغییر مقدار این وزنه هامرکز جرم و شعاع ژیراسیون را تعیین میشود. در جدول زیر این مشخصات آورده شده است.

در مدل حاضر بدلیل محدودیت فضا و وزن بالای وزنه ها از سرب استفاده نمودیم.

با استفاده از روابط:

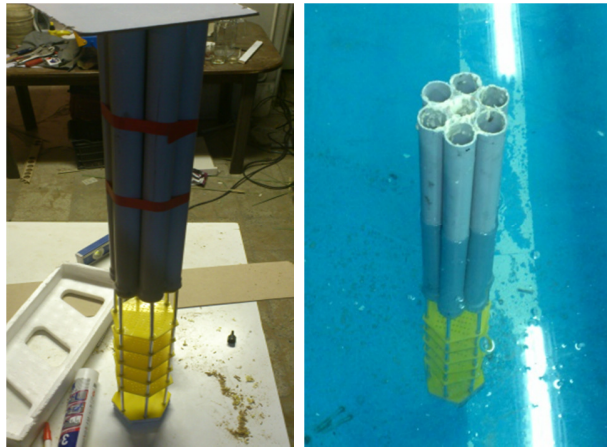
$$k_G = \frac{\sum m_i \times r_i}{\sum m_i} \quad (25)$$

$$R = \frac{\sum m_i \times r_i^2}{\sum m_i} \quad (26)$$

مرکز جرم و مرکز بویانسی بدست می آید. برای رسیدن به توزیع وزن مناسب نیاز به یک وزنه ۵۴۰ گرمی در فاصله ۸۷/۵ سانتی و یک وزنه ۱۱۰ گرمی در ۲/۸ سانتی و یک وزنه ۶۳۰ گرمی در ۱/۵ سانتی از کیل داریم. لازم بذکر است که قبل از ساخت یک تخمین از مقادیر فوق بدست می آید پس از ساخت مدل با تعیین دوباره وزن و مرکز ثقل مقادیر فوق بصورت دقیق تعیین شده است.

### آبند نمودن مدل

پس از ساخت مدل نوبت به آب اندازی آن میرسد. هدف از این کار علاوه بر اطمینان از آب بند بودن سازه بررسی تست کجی سازه و متعادل کردن مدل می باشد. جهت آبند نمودن مدل برای بخش های بیرونی از چست سیلیکون و برای بخش های داخلی از فوم استفاده میکنیم. در صورت انحراف مدل با استفاده از یک تراز و وزنه های کوچک سازه را تراز می کنیم.

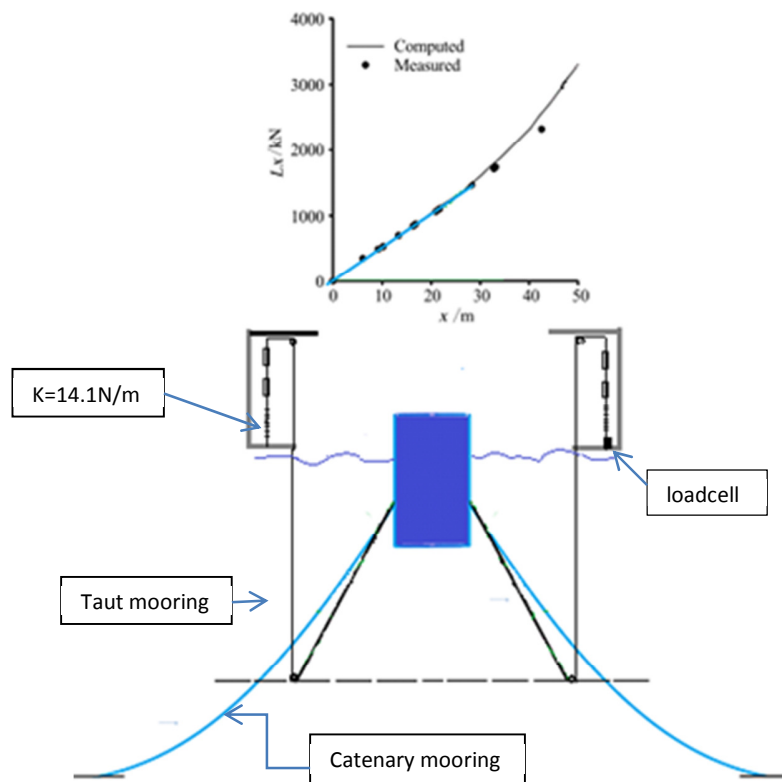


شکل ۳- مدل سکوی اسپار سلول خرپایی ساخته شده در آزمایشگاه دریا شریف

### مدلسازی خطوط مهار

بدلیل عمق کم حوضچه و کوچک بودن مقیاس مدلسازی خطوط مهار را نمی توان بصورت کنتری مدل نمود برای مدلسازی خطوط مهار از سیستم جرم و فنر استفاده می کنیم. از آنجایی که سختی فنرها در این مقیاس مقدار کمی می باشد در اثر پیش کشیدگی دچار تغییر طول زیادی می گردد به همین منظور از یک مکانیزم طراحی شده با استفاده از قرقره و نخ خطوط مهار را بصورت tau مدل می کنیم.





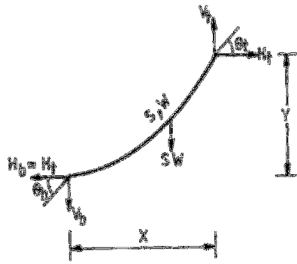
شکل ۴- نمودار نیرو و جابجایی سکو [7] و مکانیزم مدلسازی مهارها کنتری با جرم و فنر

از آنجایی که مقیاس مدلسازی مقدار کوچکی می باشد استفاده مستقیم از فنر معادل و اعمال پیش کشیدگی مقدور نمی باشد برای حل این مسئله از مکانیزم زیر شامل چهار قرقره برای متوازن نمودن مقدار پیشکشیدگی و فنر معادل استفاده می شود. در این مکانیزم فنر معادل که دارای مقداری برابر  $0.881$  نیوتن بر متر با زاویه  $50/28$  درجه از افق می باشد که در مکانیزم طراحی شده از فنری معادل  $14.1$  نیوتن بر متر استفاده می شود.

نمودار شکل ۴ از مرجع [7] نمودار نیرو- جابجایی برای سکو می باشد. با فرض حرکات کوچک برای سکو میتوان در بخش اول سختی سیستم مهار را خطی در نظر گرفت. با این فرض در مکانیزم شکل ۴ از یک فنر کششی استفاده می کنیم. سختی هر فنر با در نظر گرفتن زاویه و تعداد فنر مشخص می شود.

فرض هایی که در تحلیل مهار در نظر گرفته می شود عبارتست از:

- (۱) کف دریا بدون شیب و صلب در نظر گرفته می شود. از اصطکاک کف صرف نظر می کنیم.
- (۲) المان های مهار به آرامی حرکت می کنند و از درگ مهار صرف نظر شده است.
- (۳) تغییر هندسه و تنش محوری در اثر موج و جریان حائز اهمیت می باشد.
- (۴) طول اولیه مهار و طول بخش لنگر مهار در اثر نیروی اولیه تغییر می کند.
- (۵) تنها حرکت افقی مهار در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- مقطع مهبار [9]

رابطه نیرو و جابجایی مهبار غیر خطی می باشد و نیاز به حل عددی دارد. در تحلیل مهبار معادله کنتری برای برقراری ارتباط بین نیرو و جابجایی مورینگ استفاده می شود. در شکل ۵ مقطعی از مهبار و نیروهای وارده آورده شده است.  $S$  طول مهبار،  $H_t$  نیروی افقی،  $w$  وزن واحد طول مهبار در آب،  $\theta_t$  و  $\theta_b$  شیب بالا و پایین مهبار.

$$Y = \left(\frac{H_t}{w}\right) [\cosh(\sinh^{-1}(\tan(\theta_t))) - \cosh(\sinh^{-1}(\tan(\theta_b)))] \quad (27)$$

$$X = \left(\frac{H_t}{w}\right) [\sinh^{-1}(\tan(\theta_t)) - (\sinh^{-1}(\tan(\theta_b)))] \quad (28)$$

$$\tan(\theta_b) = \frac{V_t - WS}{H_t} \quad (29)$$

اگر زاویه لنگر صفر باشد، داریم:

$$Y = \left(\frac{H_t}{w}\right) [\cosh(\sinh^{-1}(\tan(\theta_t))) - 1] \quad (30)$$

$$X = \left(\frac{H_t}{w}\right) [\sinh^{-1}(\tan(\theta_t))] \quad (31)$$

اگر نیروی افقی، شیب بالا، وزن مهبار و عمق آب مشخص باشد،

$$\tan(\theta_b) = \sinh(\cosh^{-1} \left[ \cosh \left\{ \sinh^{-1}(\tan(\theta_t)) \right\} - \left( \frac{YW}{H_t} \right) \right]) \quad (32)$$

$$S = H_t(\tan(\theta_t) - \tan(\theta_b))/W \quad (33)$$

که مقدار  $X$  از معادله ۲ بدست می آید. فرض کنیم کشش اولیه  $T_0$  در طول اولیه  $S_0$  باشد. مقدار طول خط مهبار برای مقدار کشش  $T$  برابر می باشد با:

$$S = S_0 \left(1 + \frac{T - T_0}{EA}\right) \quad (34)$$

که  $E$  مدول یانگ و  $A$  سطح موثر مهبار است.  $T_0$  و  $T$  مقدار کشش خطی متوسط در دوسر مهبار می باشد. وزن واحد طول مهبار می شود.

$$W = \left(\frac{S_0 W_0}{S}\right) \quad (35)$$

مقادیر  $H_0$ ،  $\theta_0$  و  $h$  عمق آب مشخص میباشد با استفاده از روابط بالا و یک روش عددی ساده میتوان شکل مهبار و نمودار نیرو-جابجایی را بدست آورد. [9]

### بحث و نتیجه گیری

در مقاله حاضر با اهمیت مدلسازی و اصول اولیه مدلسازی آشنا شدیم. در بخش های بعد اصول مدلسازی برای سکوهای آب عمیق مطرح شد و در ادامه بصورت خلاصه روند و مراحل مدلسازی سکوی اسپار را بررسی نمودیم. لازم بذکر است که مدلسازی سکوی آب عمیق حتی باوجود امکانات کافی کار دشواری می باشد حال که ما با محدودیت های زیادی از جمله عمق حوضچه های موجود روبرو هستیم. رسیدن به روشی برای تست سکوهای آب عمیق در حوضچه های کم عمق امری حائز اهمیت می باشد.

## تقدیر و تشکر

از آقایان علی احمدی و جعفر رشیدی که در نگارش این مقاله ما را یاری نمودند تشکر و قدردانی می\_نماییم.

## مراجع

۱. تابش پور م.ر، "تحلیل ارتعاشی سکوه‌های آب‌های عمیق"، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف ۱۳۹۲.
۲. "بررسی تجربی سکوی پایه کششی در امواج"، پایان نامه کارشناسی ارشد امیرحسین رزاقیان، اساتید راهنما تابش پور م.ر، سیف م.س، دانشگاه شریف ۱۳۹۲.
۳. تابش پور م.ر، قیصری ح.ر، سیف م.س، "مروری بر تجربیات پیرامون سکوی اسپار برای آب‌های عمیق"، مجله فراساحل ارونند شماره ۵۷.
4. M.J.Downie , J.M.R Graham." An experimental investigation of motion control device of truss spar."In: marine structure,2000.
5. Zhang F, Yang J-M, Li R-P, Chen G." Coupling effects for cell-truss spar platform: comparison of frequency- and time-domain analyses with model tests."In: Journal of Hydrodynamics; 2008.
6. Zhang F, Yang JM, Li RP, Chen G." Numerical study on the hydrodynamic behavior of a new cell-truss spar platform". In: Proceedings of the 26th international conference on offshore mechanics and arctic engineering; 2007.
7. Yihua Su, Jianmin Yang, Chen G." Model test verification of a cell truss spar using hybrid model testing technique". In: Proceedings of the 26th international conference on offshore mechanics and arctic engineering; 2007.
8. Fan Zhang, Jianmin Yang, Runpei Li, Zhiqiang Hu." Effects of heave plate on the hydrodynamic behaviors of cell spar platform". In: Proceedings of the 25th international conference on offshore mechanics and arctic engineering; 2006.
9. A.K Agarval, A.K Jain." Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves". In: Ocean engineering30; 2003.