نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری- دانشکده فنی، دوره ٤٥، شماره ١، فروردین ماه ١٣٩٠، از صفحه ۴۵ تا ۵۲

تحلیل دینامیکی اندرکنش امواج خطی با سکوی شناور اسپار

محمد جواد کتابداری*[1] و سینا میرزایي صفت[2]
[1] دانشیار دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایي - دانشگاه صنعتی امیرکبیر
[2] دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایي
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت ۸۶/۱۱/۲۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۷/۲۷، تاریخ تصویب ۸۹/۹/۷)

چکیده

سکوي اسپار، نمونه‌اي از يك سازه حجيم است كه براي استخراج مواد نفتي در اعماق زياد بسيار مناسب مي باشد. با توجه به ابعاد بزرگ اين سكو، روابط موريسون به منظور برآورد نيروهاي وارد بر سازه و همچنين تحليل‌هاي ديناميكي صادق نيست، بر اين اساس در اين مقاله، نيروي موج وارد بر سكوي اسپار و هم‌چنين ضرائب هيدروديناميكي ميرايي و جرم‌اضافه، در شش درجه آزادي به وسيله تئوری تفرق محاسبه شده است. موج برخوردي، خطي و هارمونيك در نظر گرفته شده است و روش عددي كه به منظور حل توابع پتانسيل امواج تفرق و تابش استفاده شده است، روش عددي تفاضل محدود مي‌باشد. نتايج به دست آمده نشان داد كه مدل تهيه شده با دقت خوبی قادر به برآورد نيروی امواج و ضرائب هيدروديناميكی برای سكوی اسپار با در نظر گرفتن پديده تفرق مي‌باشد.

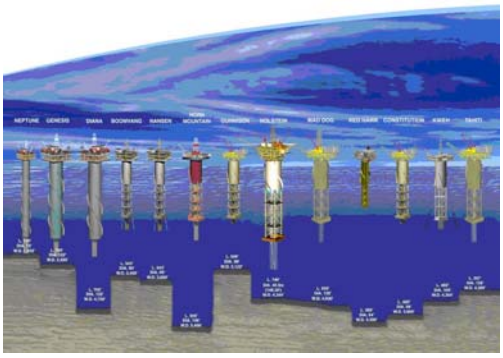
واژه های کلیدی: سکوی اسپار، تئوری تفرق، تابع پتانسیل، معادله لاپلاس، تفاضل محدود

مقدمه

سکوهای اسپار[1] در ابتدا به عنوان بویه‌های تحقیقاتی و به منظور جمع‌آوری اطلاعات اقیانوس‌شناسی استفاده می‌شدند. اولین اسپار تحقیقاتی متعلق به نیروی دریایي ایالات متحده فلیپ با ۱۲ فوت قطر، ۲۰ فوت آبخور و پریود طبیعی ۲۹ ثانیه و عمق عملیاتی ۲۷۰ فوت بود که در سال ۱۹۶۵ و به منظور امور تحقیقاتی در سواحل اطراف کالیفرنیا نصب شد.

در بین دهه های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ اسپارهای دیگری نیز در نقاط مختلف جهان ساخته شد که از آن جمله می توان به اسپار نپتون تلگراف در اوایل دهه ۱۹۶۰ در دریای ژاپن اشاره کرد. این اسپار یک ایستگاه مایکروویو به قطر متغیر ۱۰ الی ۲۰ فوت و ارتفاع ۴۴۵ فوت بود. در سال ۱۹۹۲ نیز اسپاری با قطر متغیر ۵.۵ تا ۷.۵ فوت، ارتفاع ۲۳۳ فوت و آبخور ۱۷۰ فوت که توانایی سوزاندن ۱۰۰ میلیون متر مکعب گاز در روز را داشت، در آفریقا نصب شد.

اما اولین سکوی اسپار جهان که به منظور استخراج و حفاری منابع نفتی ساخته شد نپتون به قطر ۷۲ فوت و ارتفاع ۷۵۰ فوت بود، که در سال ۱۹۹۶ توسط کمپانی کرمک‌گی و در عمق ۱۹۳۰ فوتي خليج مكزيک نصب شد. تا به امروز ۱۴ عدد سکوی اسپار در جهان ساخته شده و یا در حال ساخت می باشد، که در شکل (۱) تصویر این سکوها آمده است.



شکل ۱: نمايي از سكوهاي اسپار ساخته شده و در حال ساخت جهان.

سکوهای اسپار نیز مانند سکوهای پایه کششی توسط کابل به بستر دريا مهار مي‌شوند، با اين تفاوت كه مهارهاي آنها عموما از نوع مهارهاي كتنری[2] می باشد. از لحاظ اقتصادي و پايداری سكوهاي اسپار نسبت به سكوهاي پايه كششی مناسبتر هستند. از جمله برتري هاي ديگری كه اين نوع سكوها نسبت به ساير سكوهای ثابت و متحرک دارند، عمق عملياتی بالای اين نوع از سكوها است كه توانايی نصب تا عمق ۳۰۰۰ متر را نيز دارا هستند.

* نویسنده مسئول : تلفن : ٦٦٤٠٠٢٤٣ , فاکس : ۶۶۴۱۴۲۱۳ , Email: ketabdar@aut.ac.ir

با توجه به اینکه سکوهاي اسپار عموماً سازه حجیم محسوب مي‌شوند، لازم است که به منظور محاسبه نیروي موج وارد بر سازه و همچنین تحلیل دینامیکي آن از تئوري تفرق استفاده شود. Ran و Kim در سال ١٩٩۶، به تحلیل مهار سکوهاي اسپار تحت امواج منظم و جریان دریایي پرداختند [١]. آنها در تحقیقات خود سازه را لاغر فرض کردند تا بتوانند از معادلات موریسون[٣] در محاسبات خود استفاده کنند. Agarwal و Jain در سال ٢٠٠٢ به تحلیل دینامیکي سکوهاي اسپار با مهارهاي کلمپ تحت اثر امواج منظم و غیرمنظم پرداختند. آنها نیز از تفرق[۴] صرفنظر کردند و از معادلات موریسون در محاسبات خود استفاده نمودند [٢].

Veldman و Klifsman روش عددي حجم محدود[۵] و با حل معادلات ناویراستوکس، و مدل کردن سطح آزاد به روش VOF، در حوزه زمان نیروي وارد بر سازه را محاسبه نمودند [٣]. لازم به ذکر است که معمولاً در طراحي مهندسي سکوهاي دریایي، محاسبات مربوط به آنالیز دینامیکي و همچنین محاسبه نیروي وارد بر سازه، در حوزه فرکانس انجام مي‌شود و در آنالیز مهار، ضربه، انفجار و غیره از حوزه زمان استفاده مي‌شود. Teng و Kato به محاسبه نیروهاي وارد بر یك سیلندر شناور بر اثر اندرکنش با امواج منظم درجه دوم و سوم بر اساس تئوري تفرق و در حوزه فرکانس پرداختند. آنها از روش عددي المان مرزي[۶] استفاده نمودند و نتایج عددی و همچنین نتایج آزمایشگاهي فلوم موسسه تحقیقات کشتی ژاپن با طول ۴٠ متر و عرض ٢٧ متر مقایسه نمودند [۴و۵].

Ray و Newman در سال ٢٠٠٠ به روش المان مرزی، دامنه حرکات، نیروها و ممان‌های وارد بر سیلندر را در شش درجه آزادی و در حوزه فرکانس بر روی مدل‌های مختلفی از جمله استوانه محاسبه نموده اند. روش المان مرزی از مش‌های سطحی استفاده می نماید و اساس آن تعیین تابع گرین برای مسئله مورد نظر است. نتایج تحقیق حاضر با نتایج این محققین معتبرسازی شده است [۶].

کشف منابع جدید نفتی در نقاط عمیق دریای خزر لزوم استفاده از سکوهاي شناور یا نیمه‌شناور از جمله سکوي اسپار در کشور ما را نیز باعث گردیده است. بر این اساس در این تحقیق با روش عددي تفاضل‌محدود[٧] و با در نظر گرفتن اثر تفرق و تابش موج، نیروهاي وارد بر سکوي اسپار و هم چنین ضرائب هیدرودینامیکي میرایي و جرم‌اضافه، در شش درجه آزادي محاسبه شده است.

نیروهای دینامیکی وارد بر سازه های حجیم در دریا

امواج بزرگترین نیروی دینامیکی را بر سازه‌هاي دریایي وارد می‌کنند. محاسبه نیروی موج وارد بر سازه‌های دریایي و هم‌چنین تحلیل دینامیکي آنها از فاکتورهای مهم در طراحی این سازه‌ها محسوب می‌شود. امواج داراي خواص غیرخطي هستند و نیرویي متغیر نسبت به زمان دارند. اما عموماً در بررسي‌هاي ساده، تناوبی و هارمونیک فرض می‌شوند.

با توجه به اینکه سکوی اسپار از نوع تطبیقی و شناور در آب عمیق است (اعماق بیستر از ۵٠٠ متر) و ارتباط آن با بستر دریا توسط کابل کاتنری می باشد تغییر مکان پایه ناشی از نیروی زلزله و شتاب منتج از آن نمی تواند مشابه سازه های خشکی به سکو اثر نماید. ازطرفی امواج ایجاد شده در اثر زلزله از نوع امواج با طول موج حدود چند کیلومتر بوده و در آب عمیق ارتفاعی کمتر از یک متر دارند. لذا در مجموع می توان گفت پدیده زلزله برای این نوع سکو کنترل کننده نیست.

در سازه‌های لاغر با توجه به ابعاد کوچک سازه نسبت به طول موج (نسبت قطر سازه به طول موج کوچکتر از٠/٢)، مشخصات و پارامترهای موج در قبل و بعد از برخورد با سازه چندان تغییری نمی‌کنند. در واقع تغییرات بوجود آمده، قابل چشم‌پوشی است. اما در سازه‌های حجیم با توجه به ابعاد بزرگ سازه نسبت به پارامترهای موج، تغییرات پارامترهای موج قابل چشم‌پوشی نیست [٧]. سکوی اسپار از جمله سازه‌هایي محسوب می‌شود که با توجه به حجیم بودن و بزرگ بودن نسبت قطر سازه به طول موج برخوردی، میزان نیروی درگ وارد بر سازه در مقایسه با نیروی اینرسی قابل چشم‌پوشی است. در حالت کلی در صورتی که نیروی درگ از ١٠ درصد نیروی کل وارد بر سازه کوچکتر باشد، می‌توان از اثر لزجت غیر از نقاط تیز و هم‌چنین نقاط جدایي صرفنظر کرد. در صورتی که نسبت قطر سازه به طول موج برخوردی بیشتر از ٠/٢باشد، آنگاه باید اثر تفرق موج را نیز در نظر گرفت.

با صرفنظر از اثر لزجت سیال غیرچرخشی بوده لذا معادله حاکم بر مسئله، معادله لاپلاس[٨] می‌باشد:

$$\nabla^2\phi=\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2}=0 \quad (۱)$$

به طور کلی مسئله را می‌توان به دو بخش حل معادله لاپلاس تفرق موج و حل معادله لاپلاس تابش موج تقسیم کرد. در قسمت اول معادله لاپلاس تفرق هنگامی که جسم شناور به صورت ثابت است و موج رفت بر سازه برخورد می‌کند حل می‌شود. قسمت دوم تابش موج و به دست آوردن نیروهای وارد بر سازه (نیروی جرم اضافه و نیروی میرایی) به دلیل حرکت جسم در آب ساکن است[۸]. در نتیجه تابع پتانسیل کل برابر است با مجموع توابع پتانسیل موج رفت، تفرق و تابش:

$$\phi=\phi_I+\phi_D+\phi_R \quad (۲)$$

معادله حرکت در هر سه تابع پتانسیل موج رفت[۹]، تفرق و تابش[۱۰]، معادله لاپلاس می‌باشد، که با شرایط مرزی کف و سطح آزاد و سطح جسم به صورت جداگانه برای هر یک محاسبه می‌گردد. شرط مرزی خطی سطح آزاد به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\left.\frac{\partial\phi}{\partial z}+\frac{1}{g}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}\right|_{z=0}=0 \quad (۳)$$

شرط مرزی کف نیز با توجه به صفر در نظر گرفتن سرعت عمود بر کف به صورت معادله زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\nabla\phi\cdot\hat{n}=\frac{\partial\phi}{\partial n}=0 \quad (۴)$$

در سطح جسم، معادله ۲ باید شرط مرزی زیر را ارضا کند:

$$\frac{\partial\phi_I}{\partial n}+\frac{\partial\phi_D}{\partial n}+\frac{\partial\phi_R}{\partial n}=V_B \quad (۵)$$

که V_B سرعت سطح جسم است و بردار n، بردار عمود بر سطح جسم است. در موج تفرق، با توجه به ثابت بفرض کردن جسم شناور در سیال، سرعت برابر صفر است:

$$\frac{\partial\phi_I}{\partial n}+\frac{\partial\phi_D}{\partial n}=0 \quad (۶)$$

در نتیجه شرط مرزی جسم در موج تابش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial\phi_R}{\partial n}=V_B \quad (۷)$$

به منظور تحلیل دینامیکی سیستم مناسب‌تر است که تابع پتانسیل به صورت مختلط نوشته شود:

$$\phi(x,y,z,t)= \quad (۸)$$
$$\mathrm{Re}\left\{\left[a\cdot\hat{\phi}_I+a\cdot\hat{\phi}_D\right]\cdot e^{i\omega t}+\phi_R\right\}$$

که در آن a و ω و $\phi_I=\mathrm{Re}\left\{a\cdot\hat{\phi}_I\cdot e^{i\omega t}\right\}$ به ترتیب دامنه و فرکانس و تابع پتانسیل مختلط موج رفت می‌باشد. دامنه تابع پتانسیل موج رفت ($\hat{\phi}_I$) و دامنه تابع پتانسیل موج تفرق ($\hat{\phi}_D$) تابعی از عمق آب و موقعیت مکانی می‌باشد. تابع پتانسیل موج تابش تابعی از دامنه موج رفت نمی‌باشد و بر اساس میزان حرکت جسم شناور بدون حضور موج به دست می‌آید. میزان حرکت جسم به صورت x_j بیان می‌شود که j از ۱ تا ۶ تغییر کرده و معرف شش حرکت جسم صلب به شرح ذیل می باشد:
(Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch and Yaw)

$$\phi_R=\sum_{n=1}^{6}\dot{x}_j\cdot\phi_j \quad (۹)$$

تابع پتانسیل موج رفت بدون حضورجسم، و بر اساس معادله حاکم لاپلاس و بر حسب شرایط مرزی سطح صورت مختلط به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\nabla^2\hat{\phi}_I=0 \quad (۱۰)$$

$$-\omega^2\cdot\hat{\phi}_I+g\left.\frac{\partial\hat{\phi}_I}{\partial z}\right|_{z=0}=0 \quad (۱۱)$$

$$\left.\frac{\partial\hat{\phi}_I}{\partial z}\right|_{z=-h}=0 \quad (۱۲)$$

تابع پتانسیل تفرق حاصل برخورد موج با سازه است. پس در حل تابع پتانسیل موج تفرق، علاوه بر شرایط مرزی سطح آزاد و شرایط مرزی کف، باید شرایط مرزی جسم نیز لحاظ گردد. معادلات تابع پتانسیل مختلط موج تفرق نیز به صورت زیر هستند:

$$\nabla^2\hat{\phi}_D=0 \quad (۱۳)$$

$$-\omega^2\cdot\hat{\phi}_D+g\left.\frac{\partial\hat{\phi}_D}{\partial z}\right|_{z=0}=0 \quad (۱۴)$$

$$\left.\frac{\partial\hat{\phi}_D}{\partial z}\right|_{z=-h}=0 \quad (۱۵)$$

$$\frac{\partial\hat{\phi}_D}{\partial n}=-\frac{\partial\hat{\phi}_I}{\partial n} \quad (۱۶)$$

ترم پتانسیل تابش نیز بر اساس معادله حاکم لاپلاس و با توجه به شرایط مرزی سطح آزاد و کف و همچنین شرایط مرزي روي سطح جسم منظور مي‌گردد:

$$\nabla^2\phi_R=0 \quad (۱۷)$$

$$\left.\frac{\partial^2\phi_R}{\partial t^2}+g\frac{\partial\phi_R}{\partial z}\right|_{z=0}=0 \quad (۱۸)$$

$$\left.\frac{\partial \phi_R}{\partial z}\right|_{z=-h} = 0 \qquad (۱۹)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = \nabla \phi_R \cdot \hat{n} = \vec{V}_B \cdot \hat{n} \qquad (۲۰)$$

شرایط مرزي روي سطح جسم در حل معادله لاپلاس ترم پتانسیل تابش، به صورت سرعت سیال در روي سطح جسم برابر با سرعت جسم منظور می‌گردد. تابع پتانسیل کل دو بعدی و برای موجی که در جهت x حرکت می‌کند به صورت زیر است :

$$\phi(x,z,t) = \phi_I + \phi_D + \phi_R = \qquad (۲۱)$$
$$\mathrm{Re}\{(a\hat{\phi}_I + a\hat{\phi}_D)\cdot e^{i\omega t} + \hat{x}_n \cdot \hat{\phi}_R(x,z)\cdot e^{i\omega t}\}$$

که $x_n = \hat{x}_n \cdot e^{i\omega t}$ ، دامنه حرکت هر یک از درجات آزادی $j = 1,2,3,...,6$ است. در صورتی که از روابط موج خطی ایری برای موج رفت استفاده گردد، آنگاه:

$$\hat{\phi}(x,z) = \frac{i\omega}{k}\frac{Cosh(k[z+h])}{Sinh(kh)}\cdot e^{-ikx} \qquad (۲۲)$$

که در آن k, h به ترتیب عمق آب و عدد موج هستند. هر یک از توابع پتانسیل تفرق و تابشی باید به روش‌های عددی حل گردند. در نهایت تابع پتانسیل کل به وسیله رابطه (۲۱) محاسبه می‌گردد. با توجه به این رابطه شرط مرزی جسم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \mathrm{Re}\{a\cdot e^{i\omega t}(\nabla\hat{\phi}_I + \nabla\hat{\phi}_D)\cdot\hat{n} \qquad (۲۳)$$
$$+ \hat{x}_n \cdot e^{i\omega t}\cdot\nabla\hat{\phi}_R\cdot\hat{n}\}$$

که با توجه به رابطه زیر:

$$\hat{n}\cdot(\nabla\hat{\phi}_I + \nabla\hat{\phi}_D) = 0 \qquad (۲۴)$$

شرط مرزی روی سطح جسم نیز به شکل رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \mathrm{Re}\{\hat{x}_n \cdot e^{i\omega t}\cdot\nabla\hat{\phi}_R\cdot\hat{n}\} \qquad (۲۵)$$

برآورد نیروي وارد بر سازه

میزان نیروی وارد بر سازه بر حسب فشار سطحی وارد بر سازه محاسبه می‌گردد. فشار وارد بر روی سطح جسم نیز بر حسب معادله برنولی قابل محاسبه می‌باشد:

$$P(t) + \rho\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\rho|\nabla\phi|^2 + \rho g z = C(t) \qquad (۲۶)$$

در صورتي که امواج خطی باشند، فشار نیز می تواند به صورت خطي محاسبه گردد. لذا با حذف ترم هیدرواستاتیکي فشار و هم‌چنین حذف اثرات دینامیکي موج که درجه دوم هستند، فشار نیز به صورت خطي در می‌آید. در این رابطه $C(t)$ مقداري ثابت است که می‌تواند برابر صفر قرار داده شود. با توجه به خطي‌سازی‌هاي صورت گرفته، مقدار نیرو به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F(t) = \iint_{\bar{S}} P(t)\cdot\hat{n}\cdot ds = \iint_{\bar{S}} \rho\cdot\frac{d\phi}{dt}\cdot\hat{n}\cdot ds \qquad (۲۷)$$

در صورتي که در رابطه (۳۴) تابع پتانسیل بر حسب ترم‌هاي تابع پتانسیل موج رفت، تفرق و موج تابشی نوشته شود، داریم:

$$F(t) = \qquad (۲۸)$$
$$\mathrm{Re}\{\iint_{\bar{S}} i\rho\omega\cdot e^{i\omega t}\cdot\hat{n}\cdot(a[\hat{\phi}_I + \hat{\phi}_D] + \hat{x}_n\cdot\hat{\phi}_R)\cdot ds\}$$

در واقع هر یك از ترم‌هاي تابع پتانسیل کل، نیرویي را بر جسم وارد مي‌کنند. رابطه (۳۵) را مي‌توان به صورت زیر نوشت:

$$F(t) = \mathrm{Re}\{\hat{F}\cdot e^{i\omega t}\} \qquad (۲۹)$$
$$= \mathrm{Re}\{a\cdot(\hat{F}_I + \hat{F}_D)\cdot e^{i\omega t} + \bar{x}_n\hat{F}_R\cdot e^{i\omega t}\}$$

که $\hat{F}$ ، دامنه نیروی کل می‌باشد. دامنه نیروهاي موج رفت، موج تفرق و موج تابشی نیز بر اساس انتگرال نیرو و گشتاور روي سطح جسم و به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$\hat{F}_I = i\omega\rho\cdot\iint_{\bar{S}}\hat{\phi}_I\cdot ds \qquad (۳۰)$$

$$\hat{F}_D = i\omega\rho\cdot\iint_{\bar{S}}\hat{\phi}_D\cdot ds \qquad (۳۱)$$

$$\hat{F}_R = i\omega\rho\cdot\iint_{\bar{S}}\hat{\phi}_R\cdot ds \qquad (۳۲)$$

مقدار $a\cdot\hat{F}_I$ دامنه نیروي فرود کریلوف[11]، $a\cdot\hat{F}_D$ دامنه نیروي تفرق و لذا $a\cdot(\hat{F}_I + \hat{F}_D)$ دامنه نیروي کل وارد بر سازه است. دامنه نیروي موج تابش بر مبناي قانون دوم نیوتن بدست مي‌آید که آنرا مي‌توان به صورت تابعي از ضرایب جرم اضافه و میرایي نوشت:

$$\hat{F}_R = \omega^2\cdot m_n - i\omega\cdot C_n \qquad (۳۳)$$

در واقع ضرایب جرم اضافه و میرایي با توجه به رابطه (۳۳) به صورت زیر هستند:

$$m_n = \rho\cdot\iint_{\bar{S}}\mathrm{Re}[\phi_R]\cdot\hat{n}\cdot ds \qquad (۳۴)$$

$$C_n = i \cdot \rho \cdot \omega \cdot \iint_S \mathrm{Im}[\phi_R] \cdot \hat{n} \cdot ds \qquad (۳۵)$$

بر اساس قانون دوم نیوتن، معادله حرکت به صورت زیر نوشته می شود:

$$F(t) = -\omega^2 \cdot M \cdot \hat{x}_3 \cdot e^{i\omega t} \qquad (۳۶)$$
$$= \mathrm{Re}\{a \cdot (\hat{F}_I + \hat{F}_D) \cdot e^{i\omega t} + \hat{x}_n \hat{F}_R \cdot e^{i\omega t} + F_{Hydrostatic}\}$$

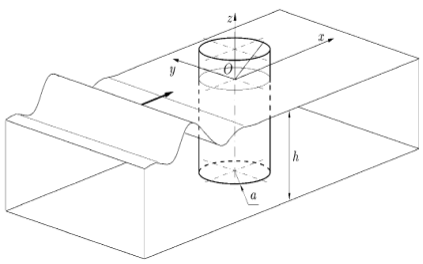
که $F_{Hydrostatic} = K_n \cdot x_n(t)$ میزان نیروي هیدرو استاتیك است. در نتیجه بر اساس رابطه (۳۶) مي‌توان دامنه حرکت درجه آزادي مورد نظر را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\frac{\hat{x}_n}{a} = \frac{\hat{F}_I + \hat{F}_D}{-\omega^2 \cdot (M + m_n) + i\omega \cdot C_n + K_n} \qquad (۳۷)$$

ضرایب جرم اضافه، میرایی و هیدرواستاتیکي و همچنین دامنه نیروي فرود کریلوف و دامنه نیروي تفرق به فرکانس ω وابسته و مستقل از ارتفاع موج هستند.

نتایج اجرای مدل روی سکوی نمونه

با توجه به شکل (۲)، هندسه مسئله به صورت یك حجم کنترل مستطیلي شکل است، که یك استوانه نیز در وسط حجم کنترل قرار دارد و موج رفت بر سازه وارد مي‌شود. با توجه به هندسه ساده و متقارن سکوهاي اسپار روشي عددي که به منظور حل معادلات تفرق استفاده شده، تفاضل‌محدود و نوع شبکه‌بندي نیز به صورت شبکه‌بندي باسازمان یکنواخت[۱۲] مي‌باشد. تفاضل محدود از مشهای حجمی استفاده می کند که اساس آن استفاده از سری تیلور برای تبدیل معادله دیفرانسیل پاره ای به مؤلفه‌های جبری است. اما مشکل محدودیت مش‌بندي دارد. در حالي که در روش المان مرزي با توجه به اینکه تنها لازم است که سطح جسم مش زده شود، این مشکل وجود ندارد. در این تحقیق به منظور حل این مشکل در روش تفاضل محدود از تکنیک بي‌بعدسازي استفاده گردیده است.



شکل ۲: نمایي شماتیك از هندسه مسئله.

با توجه به متقارن بودن هندسه سکوي اسپار معادله حاکم لاپلاس مي‌باشد که از معادلات دیفرانسیل پاره‌اي بیضوي محسوب مي‌شود. بر این مبنا معادله لاپلاس به روش گوس- سایدل[۱۳] نقطه به نقطه تجزیه شده، و روش حل مسئله نیز روش تکرار خطي[۱۴] است. در این روش ابتدا جواب‌هاي اولیه حدس زده مي‌شود و سپس مقدار جدید متغیرها محاسبه مي‌گردد. سپس از مقادیر جدید محاسبه شده، جوابهاي جدیدتر به دست مي‌آید و این کار آنقدر ادامه مي‌یابد تا معیار همگرایي تعریف شده ارضا شود [۹].

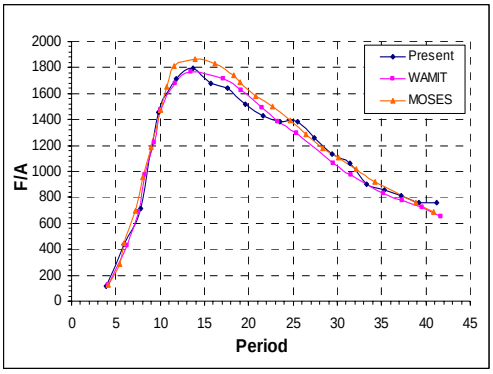
در این بخش نتایج حاصل از اجرای برنامه با نتایج تحقیقات Ray و Newman که بوسیله نرم افزارهای MOSES و WAMIT و به روش المان مرزی بر روی مدل‌های مختلفی از جمله استوانه انجام داده‌اند مقایسه می‌گردند. آنها یک سیلندر قائم شناور با مشخصات جدول (۱) را تحت اثر امواجی با پریود ۴ تا ۴۲ ثانیه و با گام‌های ۲ ثانیه ای قرار داده‌اند.

جدول ۱: مشخصات فیزیکي و هندسي سکوي اسپار.

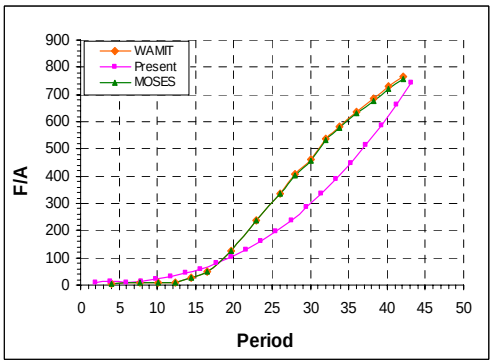
Length [m]	400
Radius [m]	20
KG [m]	200
Draft [m]	200
Mass [Ton]	256011
Ixx [m]	115.9
Iyy [m]	115.9
Izz [m]	14.14

با توجه به ابعاد بزرگ مدل Ray و Newman و نیاز به مش‌های فراوان در روش عددي تفاضل‌محدود و محدودیت مش‌بندی که بواسطه رایانه ها وجود دارد، به بی‌بعدسازی مدل اصلی پرداخته و از مدلی کوچکتر در محاسبات استفاده شد. سپس نیروها و ممان‌های وارد بر سیلندر و هم‌چنین ضرائب هیدرودینامیکي میرایي و جرم‌اضافه در شش درجه آزادی و بر حسب پریود امواج مختلف محاسبه گردید. در نهایت به کمک تشابه دینامیکی، نتایج مدل با نتایج تحقیقات Ray و Newman مقایسه گردید.

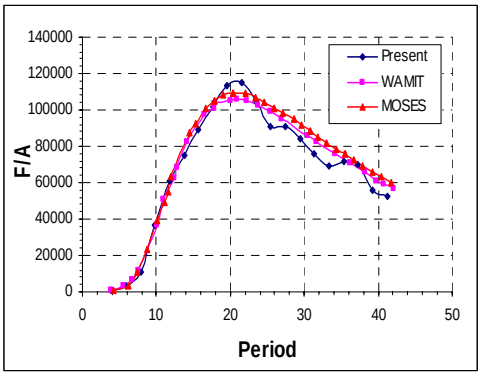
در شکل‌هاي (۳) تا (۱۰) بعضی از این نتایج نشان داده شده است.



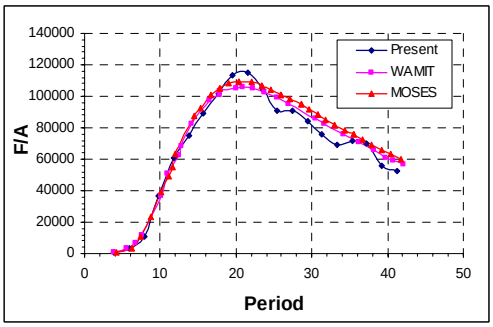
شکل ۳: نیروي موج وارد بر سازه در درجه آزادي اسوي.



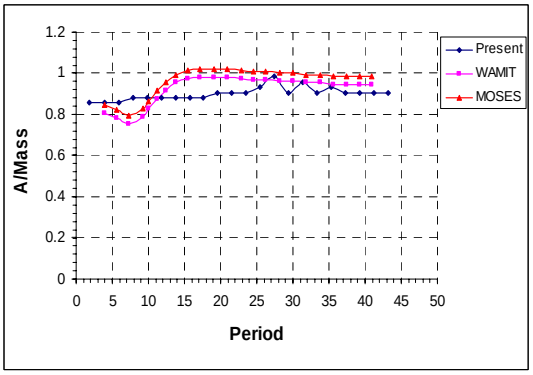
شکل ۴: نیروي موج وارد بر سازه در درجه آزادي هیو.



شکل ۵: نیروي موج وارد بر سازه در درجه آزادي رول.

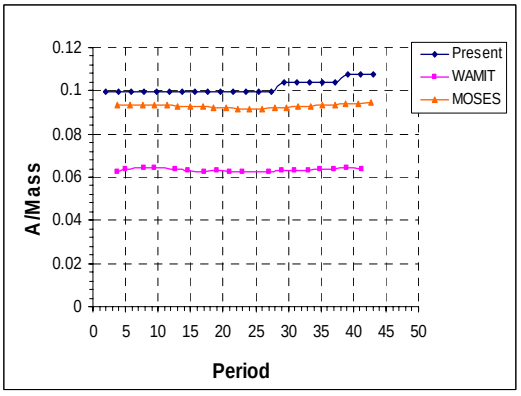


شکل ۶: نیروي موج وارد بر سازه در درجه آزادي پیچ.

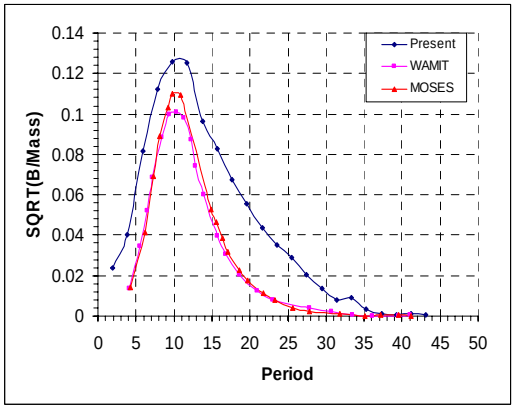


شکل ۷: ضریب جرم‌اضافه در درجه آزادي سرج.

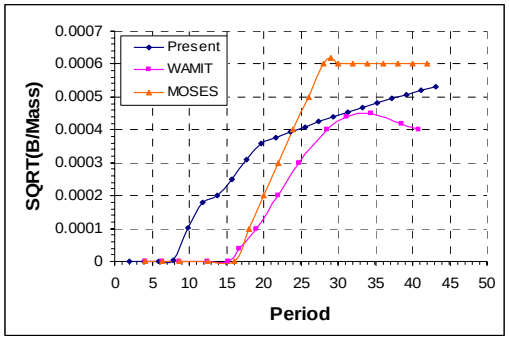
همان‌طور که در نمودارها هم مشاهده مي‌شود، نتـایج حاصل از تحلیل به روش عددي تفاضل محدود در مقایسه با نتایج Ray و Newman همخـواني خـوبي دارنـد. البتـه اختلاف‌هایي که در برخـي از نمودارهـا دیـده مـي‌شـود را مـي‌تـوان حاصـل اسـتفاده از روش‌هـاي عـددي متفـاوت دانست.



شکل ۸: ضریب جرم‌اضافه در درجه آزادي هیو.



شکل ۹: ضریب میرایي در درجه آزادي سرج.



شکل ۱۰: ضریب میرایی در درجه آزادی هیو.

با توجه به شکل (۴) کـه نمایـانگر نیـروی وارد بـر سازه در درجه آزادی هیو است، اخـتلاف بـین تحلیـل بـه روش عددي تفاضل محـدود در مقایسـه بـا نتـایج Ray و Newman نسبت به سایر درجات آزادی بیشتر مـی‌باشـد. در درجه آزادی هیو در پریودهای کمتر از ۲۰ ثانیه، نتایج به هم نزدیک بوده، امـا بـا افـزایش فرکـانس اخـتلاف‌هـا افزایش می‌یابد. شکل‌هـای (۷) و (۸)، کـه میـزان ضـرائب جرم اضافه را در پریودهـای مختلـف را نشـان مـی‌دهنـد، نتایج تحلیل به روش عددي تفاضل محدود در مقایسـه بـا نتایج مرجع از دقت خوبی برخوردار می‌باشند. امـا اخـتلاف نتایج مدل مربوط بـه ضـرائب میرایـي بـا نتـایج مرجـع در شکل‌های (۹) و (۱۰) بیشتر می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیري

همان‌طور که دیده شـد، نتـایج حاصـل از تحلیـل بـه روش عددي تفاضل محدود در مقایسه بـا نتـایج مرجـع از دقت بسیار خوبي برخوردار هستند. عموماً در فرکانس‌هاي پایین نتایج به هم نزدیکتر هستند. اما با افزایش فرکانسها اختلاف‌ها افزایش مي‌یابد. این اخـتلاف‌هـا امـري طبیعـي محسوب مي‌شـوند، زیـرا در مـدل حرکـات جسـم و مـوج برخوردي خطي و در فرکـانس‌هـای پـایین تـاثیر عوامـل غیرخطي اندک است. اما در فرکانس‌هاي بالاتر تاثیر عوامل غیرخطي افـزایش، و در نتیجـه اخـتلاف در نتـایج نهـایي بیشتر شده است.

قابل ذکر است که در واقع Ray و Newman از روش عددي المان مـرزي اسـتفاده کـرده‌انـد کـه در ایـن روش مشکل محدودیت مش‌بندي وجود ندارد. همچنین استفاده از مـش‌بنـدي غیریکنواخـت در محاسـبات آنهـا، باعـث پیچیده‌تر شدن محاسبات و البته افزایش دقت محاسـبات مي‌شود. اما در روش عددي تفاضل‌محدود تنها مي‌تـوان از مش‌بندي یکنواخت استفاده نمود. این امـر باعـث کـاهش دقت محاسبات در مقایسه با روش المان‌مرزي، در اطـراف جسم مي‌شـود. از طرفـي بـا توجـه بـه کـم شـدن حجـم محاسبات در روش تفاضل محدود، خطاي گرد کردن، کـه مربوط به خطاي رایانه در انجام محاسـبات اسـت، کاسـته مي‌شود. از مزایاي دیگر این روش نیز سادگي و سرعت در انجام محاسبات است.

به طور کلـي، بـا توجـه بـه نتـایجی کـه ارائـه شـد و همچنین خروجیهای مطلوبی که این مـدل در مقایسـه بـا نتایج سایر محققین به دست می‌دهد، مـی‌تـوان بـا دقـت قابل‌قبولی از این مدل در تحلیل دینامیکی اندرکنش امواج با سکوي اسپار و سایر سازه‌های حجیم همچون سـکوهاي وزني، نیمه‌مغروق و موج شکن‌های شناور استفاده کرد.

مراجع

1 - Ran, Z., Kim, M. H., Niedzwecki, J. M. and Johnson, R. P. (1996). “Responses of a spar platform in random waves and currents (Experiment Vs. Theory).” *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 6, No. 1.

2 - Agarwal, A. K. and Jain, A. K. (2002). “Nonlinear coupled dynamic response of offshore Spar platforms under regular sea waves.” *Ocean Engineering*, Vol.30, PP.487-516.

3 -Veldman, A. E. P. and Kleefsman, K. M. T. (2000). *Numerical Simulation of Wave Loading on a Spar Platform. University of Groningen, Department of Mathematics*, P.O. Box 800, 9700 AV Groningen, The Netherlands.

4 -Teng, B. and Kato, S. (2002). “Third order force on axisymmetric bodies.” *Ocean Engineering*, Vol. 29, PP. 815-843.

5 - Teng, B. and Kato, S. (1999). "A method for second-order diffraction potential from an axisymmetric body." *Ocean Engineering*, Vol. 26, PP. 1359-1387.

6 - Ray, J. (2000). *WAMIT-MOSES Hydrodynamic Analysis Comparison Study. New York Hull Engineering Department*, USA.

7 - Chakrabarti, S. K.. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures.* Computational Mechanics Publication, GB.

8 - Patel, M. H. (1989). *Dynamics of Offshore Structures*, Butterworth & co. Ltd, UK.

9-Hoffmann, K. A. and Chiang, S. T. (1989) ."Computational fluid dynamics for engineers." *Engineering Education System*.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Spar
2 - Catenary
3 - Morrison's Equation
4 - Diffraction
5 - Finite Volume
6 - Boundary Element
7 - Finite Difference
8 - Laplace Equation
9 - Incident
10 - Radiation
11 - Froude-Krylove
12 - Structured Uniform Mesh
13 - Gauss-Sidel
14 - Line Iterative Method