

بهینه‌سازی هندسه‌ی سکوی پایه کششی با استفاده از الگوریتم ژنتیک براساس کمینه‌سازی زمان غیرکاری در شرایط موج منظم دریا

محمدسعید سیف (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

محمد رضا تابش پور (دانشجوی دکتری)

علی اکبر گل افشانی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مسعود حیات‌داودی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

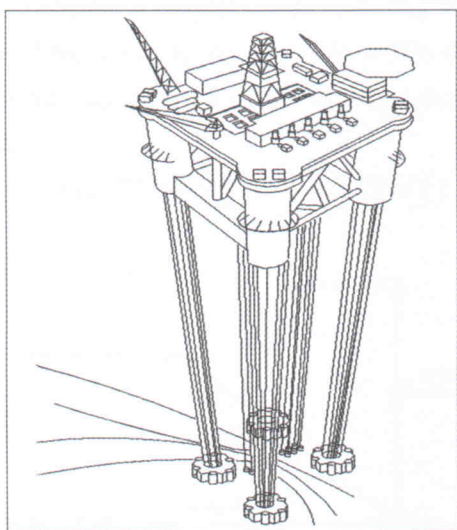
در این نوشتار، طراحی یک سکو با هدف کمینه‌سازی زمان غیرکاری^۱ دنبال شده است. در این مورد، مؤلفه‌ی شتاب قائم، بیشترین تأثیر را دارد و لذا دست‌یابی به طرحی با رفتار شتاب قائم حداقل، مطلوب است. در این بحث، نیروی وارده از سوی امواج منظم خطی، با بهره‌گیری از نظریه‌ی امواج خطی و معادله‌ی موریسون و صرف‌نظر از تأثیرات بازتاب امواج محاسبه شده است. به این ترتیب، کلیه‌ی پاسخ‌های سکو به کمک نرم‌افزار مدل‌سازی سکو استخراج شده و نهایتاً در مرحله‌ی پایانی، با به‌کارگیری روش الگوریتم ژنتیک، طرح بهینه‌سازی سکو تعیین شده و پاسخ‌های نهایی، با اطلاعات موجود مقایسه و مورد تحلیل قرار گرفته است.

مقدمه

TLP مشابه سایر سکوهای مهار شده است، با این تفاوت که نیروی شناوری^۲ بیشتر از وزن آن بوده و برای تعادل قائم به مهارهایی نیاز دارد که سازه‌ی فوقانی را به بستر دریا متصل کند. سازه در محل به صورت متعادل درآمده و به سیستم مهار قائم، متصل شده و سپس رها می‌شود و بدین صورت در مهارها کشش به وجود می‌آید. مزایای TLP عبارت‌اند از:

نیاز روزافزون بشر به انرژی از یک سو، و کاهش ذخائر انرژی موجود در خشکی‌ها و دریاها، کم عمق، از سوی دیگر، نشانگر لزوم استخراج نفت و گاز از دریاها، عمیق‌تر است. برای استخراج اقتصادی نفت در آب‌های عمیق باید از سازه‌های ابتکاری جدید که با فناوری موجود نیز قابل ساخت باشند استفاده کرد. با افزایش عمق آب، هزینه‌ی سکوهای ثابت بسیار افزایش می‌یابد، در نتیجه در دریاها، عمیق از سکوهای تطبیقی استفاده می‌شود. ایده‌ی کلیدی در سازه‌های تطبیقی، کمینه‌سازی مقاومت سازه در برابر بارهای محیطی، از طریق انعطاف‌پذیر کردن سازه است. از آنجا که در این گونه سازه‌ها اثرات غیرخطی شدیدی وجود دارد، باید به صورت دینامیکی طراحی شوند. با توجه به توضیحات فوق و از آنجا که عمق نقاط محتمل برای وجود ذخائر نفتی در دریای خزر زیاد است، انجام مطالعاتی در مورد انواع سکوهای مناسب برای دریاها، عمیق ضروری است.

در بین سازه‌های تطبیقی، سکوی پایه کششی (TLP) یک سازه‌ی بسیار مناسب برای دریاها، عمیق است. TLP در حقیقت یک سازه‌ی دوگانه است که نسبت به حرکات افقی، دارای قابلیت حرکت بوده و مانند یک سازه‌ی شناور عمل می‌کند، در حالی که نسبت به درجات آزادی قائم دارای سختی زیادی بوده و همچون سازه‌ی ثابت رفتار می‌کند. در شکل ۱ نمای TLP و اجزای آن مشاهده می‌شود.

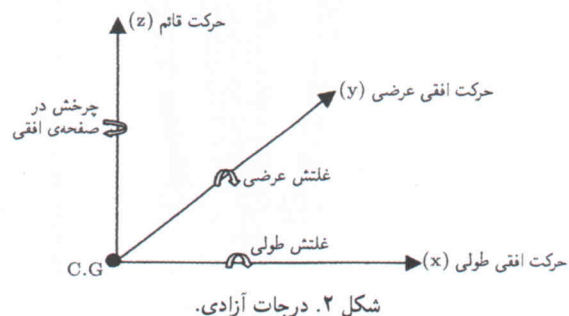


شکل ۱. نمای از TLP.

- به علت طبیعت شناور بودن، ضربه‌ی کم‌تری از موج دریافت کرده و در شرایط دریای توفانی کارکرد دارد.
- فرکانس‌های طبیعی در درجات طبیعی اصلی (surge, sway, yaw) پایین‌تر از فرکانس امواج بوده و بنابراین امکان وقوع تشدید و اعمال بارهای شدید از بین می‌رود.
- هزینه‌ی آن، به‌ویژه در آب‌های عمیق، کم‌تر از سازه‌های ثابت است.
- انتقال، نصب و از هم باز کردن آن آسان است.
- تغییر عمق عمدتاً باعث تغییر در طول مهار می‌شود.
- در نواحی لرزه‌خیز، نسبت به سکوهایی ثابت دارای ایمنی بیشتری است.
- به علت مقید بودن حرکت قائم، کنترل و تعمیر ونگه‌داری بالابرها، چاه‌های نفت و مهارها، نسبتاً آسان است.
- یک مشخصه‌ی جالب آن قابلیت انتقال تشدید از محدوده‌ی فرکانس امواج اصلی^۳ است.

TLP دارای شش درجه آزادی است: حرکت افقی طولی (surge)، حرکت افقی عرضی (sway) و حرکت قائم (heave) که به ترتیب جابه‌جایی در امتداد محورهای x ، y و z بوده و چرخش حول این محورها به ترتیب، غلتش طولی (roll)، غلتش عرضی (pitch) و چرخش در صفحه‌ی افقی (yaw). این حرکات در شکل ۲ دیده می‌شود. پاولینگ و هورتون (۱۹۷۰) با استفاده از فرایند «هیدرودینامیک خطی» روشی برای تعیین حرکات TLP و نیروهای مهار ارائه کردند.^[۱] آنها فرض کردند تمام اعضا استوانه‌یی بوده و ابعاد سطح مقطع نسبت به طول اعضا و طول موج کوچک بوده و همچنین از اثر متقابل هیدرودینامیکی بین اعضای مجاور صرف نظر کردند. جمله‌ی پسا را خطی نموده و اثر تغییرات سطح آزاد را نادیده گرفتند. نتایج حاصل از کار آنها با مدل‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت. نشان داده شده است که حرکات و نیروها بر اثر موج منظم به طور خطی با دامنه‌ی موج تغییر می‌کند.

مورگان و ملایب (۱۹۸۳) پاسخ دینامیکی TLP ها را با استفاده



از تحلیل قطعی^۴ تعیین کردند.^[۲] تحلیل آنها بر اساس ضرایب سختی غیر خطی درگیر و اینرسی دقیق و توابع نیروی پسا با استفاده از معادله‌ی موریسون بود. تاریخچه‌ی زمانی حرکت برای تحریک‌های موج منظم ارائه شد. اثرات غیر خطی، مربوط است به درگیر بودن ضرایب سختی درجات آزادی مختلف، جابه‌جایی‌های زیاد سازه‌یی و توان دوم سرعت در نیروی پسا است. درگیر بودن سختی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌یی بر رفتار سازه اثر بگذارد که مهم‌ترین آن بین حرکت قائم و طولی یا عرضی است.

مکا و همکاران (۱۹۹۴) اثرات غیر خطی نیروهای موج بر روی TLP را مورد مطالعه قرار دادند.^[۳] آنها روش‌های تقریبی متعددی برای نیروهای موج منظم و غیر منظم، با و بدون جریان را بررسی کرده و با نظریه‌ی موج مرتبه دوم استوکس مقایسه کردند. مهارها به صورت فشرده‌یی بدون جرم که سختی طولی و جانبی دارند، مدل شدند. برای TLP تحت تحریک موج منظم، دامنه‌ی حرکت طولی تحت تأثیر روش انتخابی نبود، ولی انحراف متوسط حرکت طولی نسبت به روش انتخابی حساسیت زیادی دارد. دامنه‌ی حرکت قائم و خروج از مرکزیت متوسط، هر دو تحت تأثیر روش مورد استفاده بوده ولی با حالتی که فقط پاسخ نسبت به سطح متوسط آب محاسبه شده باشد، تفاوت قابل ملاحظه‌یی ندارند. پاسخ چرخش عرضی به ویژه برای موج‌های نامنظم، تقویت شده و تحت تأثیر روش انتخابی است.

یک نکته‌ی مهم در مورد TLP این است که با استفاده از روش‌های طراحی ابداع شده در گذشته، روش‌های ساده و دارای محافظه‌کاری کم‌تری به وجود آید که طبیعت پیچیده‌ی این نوع سکو را نیز در نظر بگیرد. مطابق کار ناتویگ و وگل (۱۹۹۵) طراحی TLP های آینده باید با تمرکز بر نسبت‌های هندسی که بر بار مهارها تأثیرگذار بوده، و نیز با توجه به خود سیستم مهارها باشد.^[۴] کار آنها بر روی TLP مربعی نشان داد که سیستم مهار نامعین^۵ منجر به برخی هزینه‌های سنگین می‌شود. ایده‌ی جدید TLP مثلی که از نظر استاتیکی معین است، نیاز به وسایل پیچیده نداشته و پی‌ها می‌توانند با تولرانس بیشتری بدون تأثیر پذیری از رفتار مهارها قرار داده شوند. نکته‌ی اصلی در TLP مثلی این است که تمام مهارها، بدون توجه به جهت، سهم بار تقریباً یکسانی می‌برند و بدین ترتیب نسبت به TLP مربعی معادل، نیاز به سطح مقطع کم‌تری برای مهار دارند. مطالعات نشان می‌دهد که اگر یک TLP مثلی نیاز به ۱۲ کابل مهار داشته باشد، TLP مربعی معادل آن نیاز به ۱۶ کابل دارد. از آنجا که هزینه‌ی مهارها قابل توجه است استفاده از این ایده می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌یی شود. لی (۱۹۸۴) حل تحلیلی مسئله‌ی درگیری اثر متقابل سازه‌ی TLP دوبعدی با قطار موج خطی تکرنگ را ارائه کرد. پساهای شکل و اینرسی بر مهارهای کشسانی خطی در نظر گرفته شده است.^[۵]

- اعضای کابلی به صورت کشسان خطی مدل می‌شوند.
- اثرات خمشی و پیچشی کابل‌ها ناچیز است.
- در تنش صفر سختی تاندون‌ها حذف می‌شود.
- در شرایط تنش صفر، وزن کابل و جرم افزوده در سازه در نظر گرفته می‌شود.
- ضرایب پسا و اینرسی برای تمام اعضا و در طول تحلیل، ثابت فرض می‌شوند.
- سازه‌ی سکو به صورت جسم صلب شش درجه آزادی مدل می‌شود.
- اتصالات رابزر به سکو در نظر گرفته نمی‌شود.
- میزان پیش کشیدگی در هر چهارگوشه یکسان است.
- اثر درگیر بودن درجات آزادی منظور می‌شود.
- برای تعیین نیروی موج از معادله‌ی موریسون استفاده می‌شود.
- سینماتیک ذرات آب براساس نظریه‌ی موج خطی آیری محاسبه می‌شوند.
- آب به صورت سیال غیر چرخشی، غیرلزج و غیر قابل تراکم در نظر گرفته می‌شود.
- موج به طور یک جهته (در هر جهت دلخواه) و ایستا در نظر گرفته می‌شود.
- جریان آب در جهت موج و به صورت یکنواخت در عمق فرض می‌شود.
- میزان پیش کشیدگی در تمام تاندون‌ها برابر است.
- اثرات شکست موج لحاظ نمی‌شود.
- در هر گام زمانی اثر تغییرات در میزان کشش اصلاح می‌شود.
- ماتریس میرایی متناسب با ماتریس‌های جرم و سختی است.

معادله‌ی حرکت

معادله‌ی حرکت TLP به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{X\} = \{F(t, X, \dot{X}, \ddot{X})\} \quad (1)$$

که در آن $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی‌اند و $\{X\}$ ، $\{\dot{X}\}$ و $\{\ddot{x}\}$ به ترتیب بردارهای جابه‌جایی، سرعت و شتاب سازه‌ی و $\{F(t, X, \dot{X}, \ddot{x})\}$ نیروی وارده است. از آنجا که بردار نیرو وابسته به پاسخ است و جرم افزوده در هر لحظه تغییر می‌کند، بردار نیرو در هر گام زمانی متغیر بوده و در نتیجه روش حل گام به گام است. در این مطالعه از فرایند انتگرال‌گیری زمانی اویلر استفاده شده است.

بعد پسای غیر خطی شکل با پسای خطی بر طبق ایده‌ی لورنتز (کار معادل) جایگزین شده است. حل تحلیلی نشان داد که پسای اینرسی بر مهارها در مقایسه با پسای شکل، به علت میرا شدن موج‌ها (اثر متقابل موج - سازه) قابل اغماض است. پسای شکل بر مهارها، حرکت سازه و در نتیجه میدان موج را، به‌ویژه هنگامی که فرکانس‌های موج به فرکانس‌های تشدید سازه نزدیک باشند، تحت تأثیر قرار می‌دهد.

پاسخ دینامیکی سکوی پایه کششی تحت تحریکات منظم و تصادفی دریا با در نظر گرفتن پارامترهای گوناگون مؤثر بر رفتار سازه مورد بررسی و تشریح قرار گرفته است. [۶-۸]

در سال ۱۹۷۵ روش الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل پیچیده‌ی مهندسی مطرح شد. [۹] مهم‌ترین کاربرد روش الگوریتم ژنتیک در حل مسائل بهینه‌سازی است. از این رو این روش کاربرد زیادی دارد. در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی، هدف کمینه یا بیشینه کردن یک تابع در یک فضای مشخص است. با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک جواب بهینه در بین تعدادی از جواب‌های ممکن جست و جو می‌شود. در ابتدای کار جمعیت بزرگی از کروموزوم‌ها (جواب‌ها) به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود.

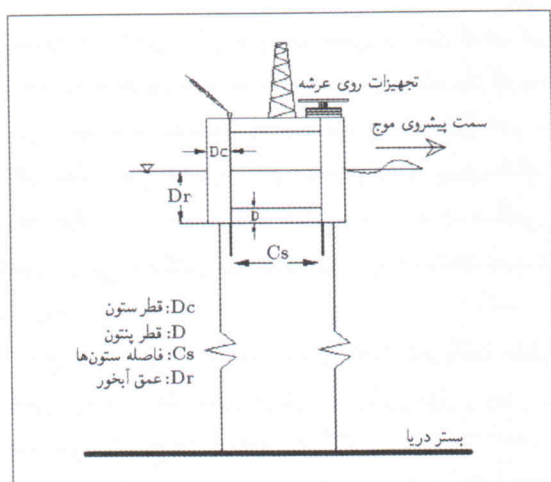
در این روش پارامتر بهینه‌سازی به صورت یک رشته با طول محدود کد گذاری می‌شود، [۱۰-۱۱] در نتیجه بردار نمایش‌گر اعداد حقیقی برای بهینه‌سازی تابع حقیقی، طبیعی تر بوده و مشکلی به وجود نمی‌آید. [۱۲] بنابراین طول رشته شامل اعداد حقیقی متناظر با تعداد متغیرهای طراحی است. مسئله‌ی موجود روش انتخاب این کروموزوم‌ها است. روش‌های متنوعی برای این کار وجود دارد. [۱۳]

روش الگوریتم ژنتیک در حل مسائلی که پاسخ مستقیم یا تحلیلی ندارند کاربرد دارد. در این روش نیازی به آگاهی در مورد چگونگی به دست آوردن پاسخ نیست. [۱۴]

در این نوشتار، با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نسبت به بهینه‌سازی هندسه‌ی سکوی پایه کششی اقدام شده است. یک برنامه‌ی رایانه‌ی تحت عنوان DAOGA^۶ به منظور حل مسئله‌ی مورد بررسی تدوین شده است.

فرضیات و ایده‌آل‌سازی‌ها

سازه‌های تطبیقی معمولاً پیچیده بوده و متعلقات زیادی نظیر اعضاء، زنجیرها، کابل‌ها، صفحات و ... را شامل می‌شوند. علاوه بر پیچیدگی‌های سازه‌ی، بارهای وارده به سازه شامل موج، باد، جریان، شناوری، ثقلی و ... نیز اثرات نسبتاً پیچیده‌ی بر سازه دارند. به منظور عملی کردن فرایند تحلیل و طراحی، باید یک سری ساده‌سازی‌هایی انجام داد. در این تحقیق فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:



شکل ۳. پارامترهای بهینه‌سازی سکوی.

ماتریس سختی

ضرائب K_{ij} از ماتریس سختی TLP به صورت عکس العمل ایجاد شده در درجه‌ی آزادی i به علت جابه‌جایی واحد در درجه آزادی j با مقید نگه داشتن سایر درجات آزادی، به دست می‌آیند. در شکل ۳ نمای TLP در وضعیت جابه‌جایی در راستای محور X و همچنین خصوصیات هندسی آن دیده می‌شود. ماتریس سختی $[K]$ برای TLP به صورت زیر است:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

در ماتریس سختی، وجود جملات غیر قطری بیان‌گر درگیر بودن درجات آزادی مختلف است.

نیروی موج

تعیین بارهای ناشی از امواج بر سازه‌های دریایی، اولین گام در فرایند تحلیل و طراحی است. در این مطالعه موقعیت ذره‌ی آب، η با استفاده از نظریه‌ی موج خطی آیری (رابطه‌ی ۶) تعیین می‌شود:

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

که در آن A دامنه موج، k عدد موج، ω فرکانس زاویه‌ی، x فاصله‌ی افقی از مبدأ و η تراز لحظه‌ی سطح آب است. اکنون می‌توان سرعت

ماتریس جرم

جرم سازه به طور متمرکز در هر کدام از درجات آزادی قرار دارد. بنابراین به صورت قطری و دارای مقادیر ثابت است. جرم افزوده M_a ، به علت وجود آب در اطراف اعضای سازه و ناشی از معادله‌ی اصلاح شده‌ی موریسون، با توجه به تراز متوسط دریا^۷ در نظر گرفته شده است. بخش متغیر جرم افزوده به علت تغییر استغراق^۸ سازه در آب در بردار نیرو در نظر گرفته شده است، به این صورت که سطح دریا در بالا یا پایین MSL قرار دارد. ماتریس جرم چنین است:

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{11} + M_{a11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} + M_{a22} & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} + M_{a33} \\ M_{a41} & M_{a42} & M_{a43} \\ M_{a51} & M_{a52} & M_{a53} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ M_{44} & 0 & 0 \\ 0 & M_{55} & 0 \\ 0 & 0 & M_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن $M_{11} = M_{22} = M_{33} = M$ جرم سازه است و r_y, r_x و $M_{66} = Mr_z^2$ و $M_{55} = Mr_y^2, M_{44} = Mr_x^2$ است. و نیز به ترتیب شعاع ژیراسیون حول محورهای x, y و z هستند. جملات جرم افزوده‌ی معادله‌ی ۲ از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آیند:

$$M_{a11} = M_{a22} = M_{a33} = \frac{1}{2} \pi D^2 (C_m - 1) \rho \quad (3)$$

M_{a4i} جرم افزوده در درجه آزادی i بر اثر نیروی هیدرودینامیکی در درجه‌ی آزادی j است.

ماتریس میرایی

با توجه به خاصیت تعامد در ماتریس‌های جرم و سختی، و با فرض متناسب بودن ماتریس میرایی با آنها می‌توان درایه‌های ماتریس میرایی را از معادله‌ی ۴ تعیین کرد:

$$\Phi^T [C] \Phi = [\xi_i \omega_i m_i] \quad (4)$$

ξ برابر ۵٪ در نظر گرفته می‌شود. ماتریس میرایی فقط براساس مقادیر اولیه‌ی ماتریس‌های جرم و سختی محاسبه می‌شود. Φ ماتریس اشکال مودی است.

که در آن $\dot{u}_c$ سرعت جریان، $\dot{u}$ سرعت افقی ذره آب، $\dot{x}$ سرعت افقی سازه، D قطر ستون، $\ddot{x}$ شتاب افقی سازه و $\ddot{u}$ شتاب افقی ذره آب است. آخرین جمله در معادله ۱۱ مربوط به جرم افزوده است و علامت‌های مثبت و منفی به ترتیب مربوط به حالاتی است که سطح آب پایین تر یا بالاتر از MSL باشد. سهم جرم افزوده‌ی بالاتر از MSL در بخش جرم‌های سازه‌ی لحاظ شده است. برآیند نیروها در سه راستای مختلف به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$SurgeForce = F_x = \left[\sum_{k=1}^n \{F_D(k) + F_I(k)\} \right]_{Column} + [F_{d_x} + F_{i_x}]_{hull} \quad (12)$$

$$SwayForce = F_y = \left[\sum_{k=1}^n \{F_D(k) + F_I(k)\} \right]_{Column} + [F_{d_y} + F_{i_y}]_{hull} \quad (13)$$

$$HeaveForce = F_z = [F_v]_{Column} + [F_{d_z} + F_{i_z}]_{hull} \quad (14)$$

$F_D(k)$ نیروی پسا، $F_I(k)$ نیروی اینرسی، k شماره المان، n تعداد المان هر عضو، α زاویه برخورد موج با سازه، و F_{d_x} و F_{i_x} به ترتیب نیروی پسا و اینرسی وارد به بدنه‌اند. همچنین F_{d_z} و F_{i_z} به ترتیب نیروی پسا و اینرسی وارد به بدنه در راستای قائم‌اند. ممان حاصله بر اثر نیروهای بالا در راستای سه محور به صورت زیر است:

$$M_x = \left[\sum_{k=1}^n \{M_D(k) + M_I(k)\} \right]_{Column} + [M_{v_x} + M_{h_x}]_{hull} + [M_{p_x}]_{Column} \quad (15)$$

$$M_y = \left[\sum_{k=1}^n \{M_D(k) + M_I(k)\} \right]_{Column} + [M_{v_y} + M_{h_y}]_{hull} + [M_{p_y}]_{Column} \quad (16)$$

$$M_z = \sum_{k=1}^n [F_D(k) + F_I(k)] y_k \quad (17)$$

M_D و M_I ممان‌های ناشی از نیروهای پسا و اینرسی است و M_{v_x} ، M_{h_x} ، M_{v_y} و M_{h_y} به ترتیب ممان‌های وارد به بدنه ناشی از نیروهای افقی و قائم به ترتیب در راستای x و y هستند. M_{p_x} و M_{p_y} ممان حاصل از فشار دینامیکی وارد به پایین ستون‌ها در راستای x و y هستند. همچنین y_k بازوی مربوط به نیروی وارد به المان k تا محور z است. بردار نیروی $\{F(t)\}$ به صورت زیر است:

$$\{F(t)^T\} = \{F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z\} \quad (18)$$

افقی، $\dot{u}(x, t)$ ، و سرعت قائم ذرات آب، $\dot{v}(x, t)$ ، را به دست آورد:

$$\dot{u}(x, t) = A\omega \cos(kx - \omega t) \frac{\cosh(kz)}{\sinh(d + \eta)} \quad (9)$$

$$\dot{v}(x, t) = A\omega \sin(kx - \omega t) \frac{\cosh(kz)}{\sinh(d + \eta)} \quad (8)$$

شتاب افقی $\ddot{u}(x, t)$ و قائم ذرات آب $\ddot{v}(x, t)$ نیز با استفاده از رابطه‌های ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند:

$$\ddot{u}(x, t) = A\omega^2 \sin(kx - \omega t) \frac{\cosh(kz)}{\sinh(d + \eta)} \quad (9)$$

$$\ddot{v}(x, t) = A\omega^2 \cos(kx - \omega t) \frac{\cosh(kz)}{\sinh(d + \eta)} \quad (10)$$

نیروهای موج وارده به اعضای استوانه‌ی سازه‌ی TLP، با استفاده از معادله‌ی اصلاح شده‌ی موریسون و براساس سرعت و شتاب نسبی بین سازه و ذرات سیال تعیین می‌شوند. معادله‌ی موریسون در محدوده‌ی $0.1 < D/\lambda$ معتبر است، D قطر عضو و λ طول موج است. برای قطرهای بزرگ‌تر اعضا نظریه‌های پیچیده‌تری که انعکاس و تشعشع انرژی موج بر اثر اعضا را در نظر می‌گیرد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه قطر اعضا به گونه‌ی است که می‌توان از معادله‌ی موریسون استفاده کرد. C_m و C_d به ترتیب ضرایب پسا و اینرسی اند. نیروهای مربوط به سایر درجات آزادی به علت موج، به صورت مشابه به دست می‌آیند. در محاسبه‌ی نیروهای موج، سینماتیک ذرات آب برای هر عضو، نسبت به مرکز ثقل آن عضو تعیین می‌شود. قسمت متغیر کشش کابل‌ها با توجه به بخش متغیر نیروی شناوری ناشی از تغییرات تراز سطح آب دریا با عبور موج تعیین شده است. در روش چاکرابارتی عمق آب تا سطح لحظه‌ی دریا، و در روش هوگین تا تراز متوسط دریا در نظر گرفته می‌شود. در هر دو روش سینماتیک ذرات آب تا تراز واقعی سطح دریا محاسبه می‌شود. انتگرال‌گیری از نیروهای جزئی وارده به پانتون‌ها و ستون‌ها به صورت عددی و با تقسیم استوانه به المان‌های کوچک صورت می‌گیرد. کل نیروی هیدرودینامیکی لحظه‌ی در هر گام زمانی با مشخص بودن جابه‌جایی، سرعت و شتاب‌های سازه‌ی تعیین می‌شود.

سینماتیک ذرات آب براساس نظریه‌ی موج خطی ایری ارزیابی شده است که در آن ارتفاع موج (H) نسبت به طول موج (L) و عمق آب (d) کوچک است. با معلوم بودن سینماتیک ذرات آب، بردار نیروی هیدرودینامیکی در هر درجه آزادی قابل محاسبه است. مطابق معادله‌ی موریسون، شدت نیروی موج در واحد طول بر روی سازه عبارت است از:

$$f(x, z, t) = 0.5 \rho_w C_d D (\dot{u} - \dot{x} - \dot{u}_{cx}) | \dot{u} - \dot{x} + \dot{u}_{cx} | + 0.25 \pi D^2 \rho_w C_m \ddot{u} \pm [0.25 \pi D^2 (C_m - 1) \rho_w \ddot{x}] \quad (11)$$

حل معادله‌ی حرکت

در رویکرد دامنه‌ی زمان، معادلات حرکت سیستم با روش انتگرال‌گیری گام به گام حل می‌شوند. روش‌های متعددی برای حل معادلات دیفرانسیل در دامنه‌ی زمان وجود دارد. در این مطالعه از روش اصلاح شده‌ی اوایلر (MEM)، که برای سیستم‌های وابسته به پاسخ، مناسب است، استفاده می‌شود. این روش به علت سادگی برای سیستم‌های وابسته به پاسخ، بسیار مناسب است و در تحلیل دینامیکی سازه‌های فراساحل با موفقیت استفاده شده است. فرض کنید x_n و $\dot{x}_n$ مقادیر معلوم جابه‌جایی و سرعت سیستم در لحظه‌ی t_n باشند ($t_n = n\Delta t$) براساس MEM، جابه‌جایی و سرعت در لحظه‌ی t_{n+1} به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \ddot{x}_n \Delta t \quad (19)$$

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_{n+1} \Delta t \quad (20)$$

به همین ترتیب مقادیر سرعت و جابه‌جایی در سایر زمان‌ها به دست می‌آید.

مطالعه‌ی موردی

پارامتر بهینه‌سازی

پارامتری که در این پروژه مورد نظر قرار گرفته، کمینه‌سازی مدت زمان غیرکاری، سکودر اثر وارد آمدن شتاب قائم است.

در مورد یک سکوی دریا، زمان غیرکاری به زمان‌هایی اطلاق می‌شود که در اثر بروز شرایط کاری حداکثری، امکان بهره‌گیری و فعالیت سکو وجود ندارد و توقف عملیاتی به وجود می‌آید. برای سکوی TLP یکی از اصلی‌ترین عوامل بروز زمان غیرکاری، شتاب قائم است که در بدترین وضعیت، سبب عدم امکان بهره‌گیری از اتصالات رابزر و سکو می‌شود. شتاب قائم، علاوه بر ایجاد زمان غیرکاری، تأثیر بسیار زیادی نیز بر وضعیت زیستی اپراتورهای انسانی روی سکو دارد. به نحوی که حتی در برخی شرایط، امکان انجام هر عملیاتی توسط اپراتورهای انسانی را مختل می‌سازد. به منظور کمینه‌سازی زمان غیرکاری نیاز به کمینه‌سازی شتاب قائم پیدا می‌کنیم. آنچه به دنبال آن هستیم، یافتن بهترین ترکیب و وضعیت سکوی TLP برای کمینه‌سازی شتاب قائم است. پارامترهای مورد بررسی در سکو که بر شتاب قائم تأثیرگذارند عبارت‌اند از:

- قطر ستون‌های سکو
- قطر پنتون سکو
- فاصله‌ی ستون‌های سکو
- عمق آب‌خور سکو

هدف نهایی، یافتن ترکیبی از این چهار پارامتر است، به نحوی که حداقل مقدار شتاب قائم به دست آید.

معرفی قیدها

آنچه در این نوشتار در هنگام اعمال بهینه‌سازی به عنوان قیدی برای رسیدن به یک ترکیب بهینه از چهار پارامتر ذکر شده مورد توجه قرار گرفته است، ثابت ماندن مقدار حجم جابه‌جایی سازه در هنگام تغییرات چهار پارامتر مذکور است. به این مفهوم که هر ترکیبی از چهار پارامتر مورد نظر، قابل قبول نیست، بلکه تنها آن دسته از پاسخ‌ها مورد نظر خواهند بود که قید ثابت بودن مقدار حجم جابه‌جایی سازه را ارضا کنند. علاوه بر این قید، امکان اعمال قیدهای دیگری نیز وجود دارد که افزایش تعداد قیدها، تغییر در ساختار فرایند دستیابی به پاسخ نهایی ایجاد نمی‌کند.

به کارگیری الگوریتم ژنتیک

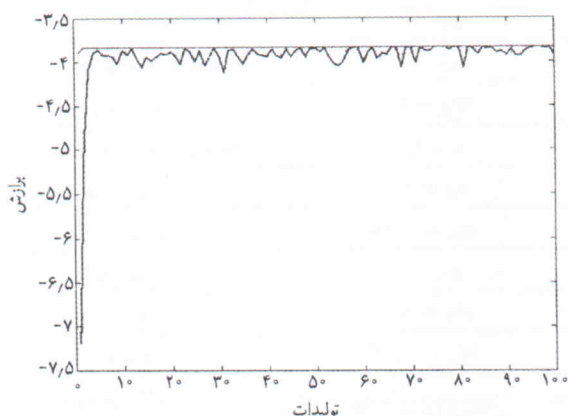
اصول اولیه‌ی الگوریتم ژنتیک توسط جان هلند و همکاران و دانشجویانش در دانشگاه میشیگان ایالات متحده در سال ۱۹۶۲ ارائه شد. آنها در تحقیقاتشان دو هدف اصلی را دنبال می‌کردند:

- ارائه شرحی دقیق و خلاصه‌ی از عملکرد قابل قبول سیستم‌های طبیعی.
- طراحی نرم‌افزار سیستم‌های ساختگی که سازوکارهای اصلی سیستم‌های طبیعی را دربر داشته باشد.

پس از این گزارش مقدماتی، تحقیق در جهت توسعه‌ی چهارچوب ریاضی این الگوریتم و به طور همزمان در زمینه‌های کاربرد آن ادامه یافت و در این راه چندین رساله‌ی دکتری ارائه شد. در نهایت، این تحقیقات منجر به انتشار کتاب سازش در سامانه‌های طبیعی و مصنوعی در سال ۱۹۷۵ شد که در حال حاضر مرجع اصلی بسیاری از بحث‌هاست. از اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ به بعد، مقاله‌ها و رساله‌های بسیاری در تأیید تکنیک بهینه‌سازی توابع توسط این الگوریتم انتشار یافته است.

مبانی نظری که الگوریتم ژنتیک بر پایه‌ی آن مستقر شده است قضیه‌ی اسکاماتا است. این قضیه توسط جان هلند مطرح شد و می‌توان گفت قضیه‌ی اساسی در توجیه عملکرد الگوریتم ژنتیک همین قضیه است. این قضیه بیان می‌کند که هر کروموزوم دارنده‌ی ژن‌هایی خوب است که در طی نسل‌های پی در پی با یک آهنگ نمایی افزایش می‌یابند. منظور از اسکاماهای خوب آن الگوهای ژنی‌اند که موجب برازندگی بالاتر برای کروموزوم می‌شوند.

الگوریتم‌های ژنتیکی، روش‌های جست‌وجوی تصادفی‌اند که از فرایند تکامل تدریجی زیستی تقلید می‌کنند. این الگوریتم‌ها بر روی



شکل ۴. روند دستیابی به پاسخ بهینه توسط الگوریتم ژنتیک در طی ساخت ۱۰۰ نسل مورد بررسی.

جدول ۱. مشخصات و شرایط سکوی اولیه‌ی مورد مطالعه.

$D_c = ۱۸$	قطر ستون‌ها (متر)
$D = ۱۲$	قطر پنتون (متر)
$T_c = ۰/۵۵ \times ۱۰^۸$	کشش اولیه (نیوتن)
$E = ۲ \times ۱۰^{۱۱}$	مدول یانگ پایه‌ها (نیوتن بر متر)
$a = ۴۵$	نصف طول (TLP متر)
$b = ۴۵$	نصف عرض (TLP متر)
$s_x = ۷۰$	طول پنتون‌ها (متر)
$L = ۲۸۰$	طول کابل‌ها (متر)
$H_c = ۷۰$	ارتفاع ستون‌ها (متر)
$c_{sx} = ۸۸$	فاصله میان پایه‌ها در راستای X (متر)
$W = ۰/۵ \times ۱۰^۹$	وزن سکوی (نیوتن)
$\xi = ۰/۰۵$	ضریب میرایی سازه
$dt = ۰/۱$	جزء‌های زمانی (ثانیه)
$t_{total} = ۲۰۰$	بازه زمانی کل (ثانیه)
$n = ۲$	تعداد ستون‌ها
$r_x = ۴۰$	شعاع ژیراسیون حول محور x
$r_y = ۴۰$	شعاع ژیراسیون حول محور y
$r_z = ۶۰$	شعاع ژیراسیون حول محور z

ویژگی‌های مشخص را در نظر می‌گیریم و به کمک نرم افزار مدل سازی TLP، پاسخ‌های سکوی به شرایط بارگذاری محیطی تعیین می‌شود. پس از آن، در همان شرایط محیطی، تغییراتی در چهار پارامتر مورد بحث اعمال کرده و با اجرای برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک، پاسخ سازه تعیین می‌شود. نهایتاً با توجه به نمودارها و مقادیر به دست برای این دو وضعیت، و نیز با توجه به معیار شتاب قائم به مقایسه‌ی نتایج حاصل با توجه به معیار شتاب قائم می‌پردازیم.

شرایط محیطی و مشخصات سازه‌ی سکوی، در جدول‌های ۱ و ۲

یک جمعیت از پاسخ‌ها عمل می‌کنند و با استفاده از اصل بقای بهترین پاسخ‌ها، اقدام به ایجاد مناسب‌ترین جواب می‌کنند. در الگوریتم‌های ژنتیکی از فرایندهایی طبیعی، مانند گزینش، ترکیب و جهش الگوگیری می‌شود.

در آغاز محاسبه، تعدادی از پاسخ‌ها ایجاد می‌شوند. سپس مقدار تابع هدف^۴ این پاسخ‌ها تعیین می‌شود. اگر معیارهای بهینه‌سازی حاصل نشده باشد، یک فرایند تولید جدید آغاز می‌شود. به منظور گزینش پاسخ‌هایی که باید نسل جدید را تولید کنند، از مقادیر برازندگی این پاسخ‌ها استفاده می‌شود. والدین ترکیب شده و فرزندان جدید را تولید می‌کنند. هر پاسخ براساس یک احتمال خاص، تحت عملیات جهش قرار می‌گیرد. این فرایندها تا زمان دسترسی به شرایط بهینه ادامه می‌یابند. به این منظور، یک نرم افزار محاسباتی به کمک زبان برنامه نویسی MATLAB تدوین شده است. این نرم افزار با داشتن فضایی تعریف شده از کروموزوم‌ها، که معرف پاسخ‌هایی برای تابع برازندگی اند، کار خود را شروع می‌کند. چنان که پیش از این نیز بیان شد، فضای پاسخ‌ها در این مسئله عبارت‌اند از: قطر ستون‌ها و پنتون، فاصله‌ی دو ستون و آبخور سازه. آنگاه با برگزیدن ساخت یافته این پاسخ‌ها نرم افزار مدل سازی سکوی فراخوانده شده و با ورودی‌هایی که از این بخش دریافت می‌دارد، پاسخ‌های سکوی تعیین می‌شود. این عملیات تا دست یافتن به یک بهینه‌ی قابل قبول از منظر الگوریتم ژنتیک ادامه خواهد یافت.

به این ترتیب، خروجی نهایی این نرم افزار، بهترین مقادیر ممکن برای پارامترهای گفته شده از منظر تابع برازندگی است.

برخی از ویژگی‌های این نرم افزار عبارت‌اند از:

- کدگذاری پاسخ‌ها (کروموزوم‌ها) به روش کدگذاری حقیقی.
- بهره‌گیری از منطق چرخ رولت به منظور ایجاد جمعیت‌های مورد نظر از کروموزوم‌ها.
- دریافت مقادیر اولیه‌ی پاسخ‌ها به صورت مقادیر پیوست.
- بهره‌گیری از منطق جهش در تولید مثل به منظور دستیابی به بهینه‌ی مطلق.
- اعمال محدودیت در اتمام برنامه تا حداکثر مقدار تشکیل ۱۰۰ نسل از پاسخ‌ها.

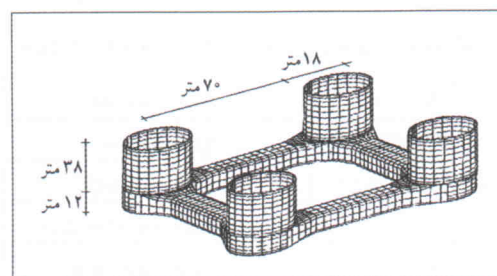
شکل ۴ نحوه‌ی نزدیک شدن الگوریتم ژنتیک به پاسخ نهایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تا رسیدن به جواب نهایی ۱۰۰ نسل از پاسخ‌های ممکن مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نتایج عددی

برای بررسی چگونگی عملکرد الگوریتم ژنتیک با معیار شتاب قائم و قید ثابت باقی ماندن حجم جابه‌جایی، ابتدا یک سکوی مرجع با

جدول ۲. شرایط محیطی مورد مطالعه.

$\rho = 1025$	چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
$W_d = 300$	عمق آب (متر)
$g = 9.81$	شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)
$c_d = 1/0$	ضریب پسا
$c_m = 1/75$	ضریب اینرسی
$w_h = 10$	ارتفاع موج
$W_l = 100$	طول موج (متر)
$W_n = 0.06$	عدد موج
$w_p = \frac{2\pi}{\sqrt{W_n \times g \times \tanh(W_n \times W_h)}}$	پریود موج (ثانیه)
$UD_c = 0.5$	سرعت جریان آب (متر بر ثانیه)



شکل ۵. اندازه‌ی پارامترهای بهینه‌سازی در سکوی مرجع.

است، به‌نحوی که در چند نسل پی در پی، تغییری در مقدار نتایج به‌وجود نیاید، نهایتاً با اتمام مراحل فوق، نتایج زیر به‌دست می‌آید:

مقدار نهایی پارامترها

قطر ستون‌های سکو ۱۶/۲ متر

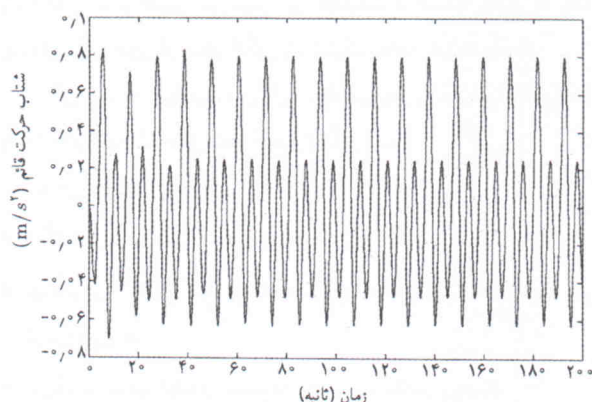
قطر پنتون سکو ۹/۷ متر

فاصله‌ی ستون‌های سکو ۶۵ متر

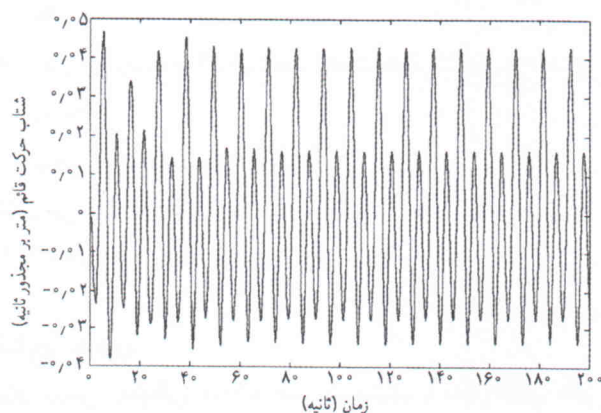
عمق آب‌خور سکو ۶۳/۹۳ متر

در ادامه به بررسی پاسخ‌های دینامیکی سکو می‌پردازیم. شکل ۶ نمودار شتاب قائم سکو، پیش از انجام بهینه‌سازی را نمایش می‌دهد. شکل ۷ نیز این نمودار را پس از انجام بهینه‌سازی نمایش می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، با انجام بهینه‌سازی، مقدار شتاب قائم از حدود ۰/۹ متر بر مجذور ثانیه، به مقدار ۰/۴۵ متر بر مجذور ثانیه رسیده است. این مقدار در حدود نصف مقدار اولیه است و تأثیر بالایی بر زمان غیرکاری می‌گذارد.

نیروهای وارد بر سکو، در شکل ۸ الف و ۸ ب تحت تأثیر امواج منظم آورده شده است. چنان که انتظار می‌رفت، با تغییرات به‌وجود آمده در سکو، که باعث کاهش مقدار شتاب قائم شد، نیروهای وارد بر



شکل ۶. شتاب قائم سکوی مرجع.



شکل ۷. شتاب قائم سکوی بهینه‌شده.

آورده شده است. مشخصات ذکر شده برای سازه‌ی سکو، مشخصاتی است که برای سکوی مرجع در نظر گرفته شده است. شرایط محیطی نیز در همه‌ی موارد یکسان در نظر گرفته می‌شود. چنان‌که ملاحظه می‌شود، سکوی مرجع پارامترهایی با مقادیر اولیه زیر دارد:

مقدار اولیه پارامترها

قطر ستون‌های سکو ۱۸ متر

قطر پنتون سکو ۱۲ متر

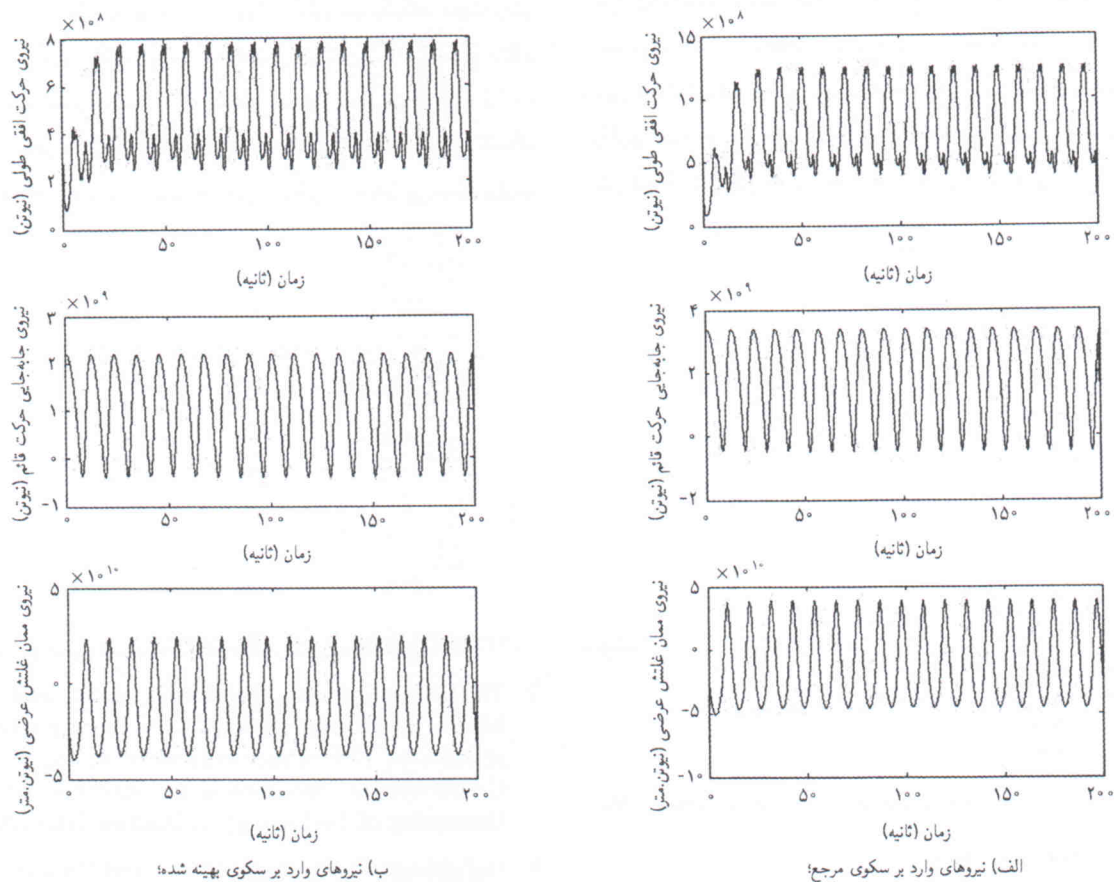
فاصله ستون‌های سکو ۷۰ متر

عمق آب‌خور سکو ۵۰ متر

شکل ۵ نشان‌گر نمایی شماتیک از ابعاد سکوی مرجع است.

پس از اجرای برنامه‌ی شبیه‌سازی TLP، نوبت به برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک می‌رسد. با فراخوانی برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک، این برنامه اقدام به اجرای مجدد نرم‌افزار مدل‌سازی سکو می‌کند و این عملیات را تا رسیدن به شرط خروج الگوریتم ژنتیک تکرار می‌کند. در اینجا شرط خروج از الگوریتم ژنتیک، ایجاد ۱۰۰ نسل از پاسخ‌ها است، به این معنا که برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک تا ۱۰۰ مرحله اقدام به تغییر پارامترهای مورد بحث و اجرای نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌کند و آنگاه بهترین پاسخ را به‌عنوان پاسخ نهایی در نظر می‌گیرد.

دیگر شرط خروجی، همگرایی پاسخ‌ها به یک جواب مشخص



شکل ۸. نیروهای وارد بر سکوی بهینه شده.

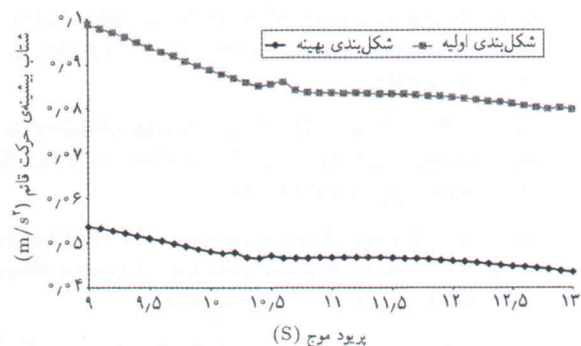
رفتار تغییرات در هر دو وضعیت است. البته این واقعیت با مشاهده نمودارهای شتاب و نیرو نیز قابل درک بود. یکسان بودن مجموعه رفتار سکو در هر دو وضعیت، بیانگر این حقیقت است که در اثر اعمال بهینه‌سازی، تفاوتی در چگونگی پاسخ‌ها به وجود نیامده است. به عبارت مناسب‌تر، تغییرات حاصله، تغییرات در کمیت‌ها هستند و کیفیت پاسخ‌ها یکسان باقی مانده است. به این ترتیب با به‌کارگیری این روش بهینه‌سازی، احتمال از بین رفتن سایر قیدهای بهینه‌سازی در اثر تغییرات به‌وجود آمده از بین می‌رود و وضعیت حداقل‌سازی اثرات منفی در رفتار سکو در اثر ایجاد تغییرات، ارضا می‌شود.

نتیجه‌گیری

به‌منظور دستیابی به وضعیت بهینه‌ی عملیاتی و حداکثر کارایی در سکوی دریایی، کمینه‌سازی دوره‌ی غیرکاری سکو ضروری است. برای نیل به این منظور، اصلی‌ترین پارامتر مؤثر شتاب قائم سکو است که علاوه بر تأثیر قابل توجه بر وضعیت غیرکاری، خود نیز مستقیماً بر عملکرد سکو و اپراتورهای انسانی و ماشین‌های موجود بر روی آن، تأثیر منفی می‌گذارد.

سکو نیز اصلاح شده و وضعیت مناسب‌تری پیدا کرده‌اند. به این ترتیب که نیروی قائم وارد بر سکو، از حدود $3/4$ گیگا نیوتن، به حدود $2/2$ گیگا نیوتن کاهش یافته است.

شکل ۹، مقایسه‌ی از تغییرات حداکثر میزان شتاب قائم در هر وضعیت از پریود امواج ارائه می‌دهد. با توجه به نمودار، حداکثر میزان شتاب قائم برای همه‌ی پریودها در وضعیت اصلاح‌شده، کم‌تر از مقدار آن در حالت اولیه است. اما نکته‌ی که قابل توجه است، یکسانی



شکل ۹. شتاب قائم سکوی بهینه شده.

موجود بوده است. ترکیب هندسی اصلاح شده، رفتار دینامیکی بسیار مناسب‌تری داشته و مؤلفه‌ی شتاب قائم آن تا حدود نصف مقدار اولیه کاهش داشته است و به این ترتیب، هدف نهایی کمینه‌سازی مدت زمان غیرکاری سازه حاصل آمده است. ابعاد هندسی جدید سکو، با در نظر گرفتن قید ثابت باقی ماندن حجم جابه‌جایی سکو تعیین شده است.

در این نوشتار، با بهره‌گیری از روش الگوریتم ژنتیک، مدت زمان دوره‌ی غیرکاری یک سکوی پایه‌کششی در شرایط وجود موج منظم دریا، کمینه شده است. برای دستیابی به این مقصود، اصلاح ترکیب هندسی سکو مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، الگوریتم ژنتیک ارائه دهنده‌ی بهترین ترکیب هندسی ممکن از میان بی‌شمار ترکیب

پانویس

1. down time
2. buoyancy
3. active wave
4. deterministic
5. indeterminate
6. Dynamic Analysis and Optimization using Genetic Algorithm
7. Mean Sea Level, MSL
8. submergence
9. objective function

منابع

1. Paulling, J.R. and Horton, E.E. "Analysis of the tension leg stable platform". In: *Proceedings of the offshore Technology Conference, OTC* (1263), pp. 379-390 (1970).
2. Morgan, J.R., Malaeb, D. "Dynamic analysis of tension leg platforms". In: *Proceedings of the Second International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Houston, pp. 31-37 (1983).
3. Mekha, B.B., Johnson, C.P., Roesset, J.M. "Effects of different wave free surface approximations on the response of a TLP in deep water". In: *Proceedings of the Fourth ISOPE*, Osaka, pp. 105-115 (1994).
4. Natvig, B.J., Vogel, H. "TLP design philosophy-past, present, future". In: *Proceedings of ISOPE*, The Hague, pp. 64-69 (1995).
5. Lee, C.P. "Dragged surge motion of a tension leg structure". *International Journal of Ocean Engineering* **21** (3), pp.311-328 (1994).

۶. تابش پور، محمدرضا، گل افشانی، علی‌اکبر و سیف، محمد سعید. «پاسخ دینامیکی غیرخطی سکوه‌ای شناور به تحریک موج منظم»، اولین کنفرانس

ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، (اردیبهشت ۱۳۸۳).

7. Tabeshpour, M.R., Golafshani, A.A., and Seif, M. S. "A Comprehensive study of dynamic responses of TLP under regular wave loads", 9th Conference on Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (2005).
8. Golafshani, A. A., Seif, M. S., and Tabeshpour, M. R., "Dynamic Analysis of TLP under random wave loads", 8th Conference on Mechanical Engineering, Tarbiat Modarres (2004).
9. Holland, J.H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press", Ann Arbor p.183 (1975).
10. Goldberg, D.E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley-Longman, Reading, MA (1989).
11. Davis, L., Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, New York p.385 (1991).
12. Obayashi, S., Tsukahara, T. and Nakamura, T., "Multiobjective genetic algorithm applied to aerodynamic design of cascade airfoils". *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **47** (1), pp. 211-216 (2000).
13. Shariat Panahi, M. "An Introduction to Genetic Algorithm", Department of Mechanical Engineering University of Alberta Edmonton, Canada (Sept.1995).
14. McCully, C. and Bloebaum, C.L. "A Genetic Tool for Optimal Design Sequencing in Complex Engineering Systems", *Struct. Optim.*, (12), pp.186-201 (1996).