تحلیل و طراحی مونوپایل تحت بار ضربه کشتی با توجه به اندرکنش دینامیکی، غیر خطی آب- سازه- خاک

حسن اکبری فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران **خسرو برگی** دانشیار دانشکده مهندسی عمران- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۴/۵/۲۴ ، تاریخ تصویب ۸۴/۱۰/۱۰)

چکیدہ

امروزه با افزایش ظرفیت و ابعاد کشتی ها و لزوم پهلوگیری شناورهایی با رده بالا در بنادر، نیاز به سازه ای مناسب با ظرفیت جذب انرژی زیاد احساس می گردد. با توجه به این امر که جذب انرژی همراه با ایجاد تغییر مکان در سازه می باشد و از طرفی سازه اسکله های معمولی از جمله اسکله های شمع و عرشه و یا بلوکی فاقد این مشخصه می باشند، سازه های مونوپایل با توجه به مزیت جذب انرژی و در عین حال مستقل بودن هزینه تعمیر و نگهداری آن از بقیه تأسیسات از مقبولیت خاصی برخوردار هستند. مزیت های ذکر شده طراحان را به استفاده از سازه مونوپایل جهت جذب انرژی کشتی های بزرگ نفتی و ترمیم اسکله های آسیب دیده سوق داده است. از آنجایی که رفتار مونوپایل هنگام برخورد تابعی از اندرکنش سازه- خاک – آب بوده و از طرفی نیروی بالای اعمالی به سازه مونوپایل همراه با پلاستیک شدن بخشی از خاک خواهد بود، لذا تحلیل دقیق رفتار مونوپایل مستلزم مدلسازی صحیح رفتار دینامیکی- غیر خطی خاک، رفتار اندرکنش دینامیکی آب و سازه و نیز مدلسازی مناسب فندر و کشتی می باشد. بهمین منظور در این مقاله با توجه به موارد فوق الذکر و به منظور لحاظ نمودن پارامترهای دخیل در الگوی رفتاری مونوپایل از نرم افزار مدلسازی صحیح رفتار دینامیکی- غیر خطی خاک، رفتار اندرکنش دینامیکی آب و سازه و نیز مدلسازی مناسب مونوپایل از نرم افزار Ansys7.0 استخراج شد

واژه های کلیدی: مونوپایل، بار ضربه، رفتار غیر خطی، اندر کنش آب و سازه و خاک

مقدمه

مزایای سازه مونوپایل از جمله میزان جذب انرژی زیاد و قابل قبول و همچنین مستقل بودن هزینه نگهداری آن از بقیه تأسیسات مرتبطه، کارایی مونوپایل را در مقایسه با سایر گزینه ها بهینه نموده و از اینرو تمایل به استفاده از این سازه گسترش یافته است. تحلیل دقیق رفتار این سازه مستلزم مدلسازی صحیح آن و بکارگیری روشهای مناسب و یذیرفته شده می باشد. برای تحلیل سازه مونوپایل تلاشهای مختلفی صورت گرفته که بطور کلی در مجموعه های ذیل قابل دسته بندی است: ۱- روش اجزا محدود ۲- روش وینکلر ۳- روش محیط پیوسته معمولاً در همه حالات، بارگذاری ناشی از برخورد کشتی مدنظر نبوده و تنها سازه تحت بارگذاری استاتیکی بدون توجه به حضور آب تحليل گشته است. اگر چه روشهای فوق توانایی لحاظ نمودن رفتار غیر خطی خاک را دارا می باشند، لیکن در تحلیل دقیق پدیده برخورد کشتی، مد نظر قرار دادن اثرات بارگذاری دینامیکی بر

رفتار غیر خطی خاک از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. همچنین با توجه به حضور آب در مجاورت سازه بررسی اندرکنش آب و سازه در حالت دینامیکی ضروری است. در این راستا و به منظور مدلسازی دقیق برخورد کشتی از نرم افزار المان محدود Ansys7.0 که توانایی در نظر گرفتن رفتار غیر خطی و بارگذاری دینامیکی بصورت همزمان را داراست استفاده گردید.

در این نرم افزار با مدلسازی کشتی، فندر، خاک، شمع و آب مجاور آن بصورت توأم روند دقیق برخورد کشتی با سازه مونوپایل مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که دقت نتایج حاصله وابسته به فرضیات صورت گرفته در مدلسازی می باشد، در ادامه روند مدلسازی اجزاء مذکور و تئوری حاکم بر هر یک بصورت مجزا ارائه می گردد.

اصول مدلسازی رفتار غیرخطی– دینامیکی خاک بر اساس معادله حاکم بر حرکت اجسام سه پارامتر سختی، جرم و میرایی در رفتار دینامیکی جسم بسیار توصیه شده است[۳]. با توجه به تنوع و فراوانی منحنی های P-y (نیرو در واحد طول شمع- تغییر مکان جانبی) ضروریست جهت مدلسازی خاک از منحنی های استاندارد توصیه شده استفاده گردد، بهمین منظور برای مدلسازی خاک رسی از منحنی ارائه شده توسط Matlock و برای خاک ماسه ای از منحنی های ارائه شده توسط ایا ارائه شده توسط Viell ایا استفاده گردیده است. با توجه به هر منحنی و به ازای یک تغییر مکان مشخص، مقدار سختی K_{eq} قابل دستیابی است (شیب منحنی در هر نقطه).

سختی و میرایی محدوده خارجی

(٢)

روابط متعددی برای بیان رفتار محدوده خارجی بسط یافته اند. (Novak etal(1978 سختی واحد طول یک سیلندر مدفون در خاک ویسکو الاستیک خطی با نسبت میرایی β و شعاع R (شعاع محدوده داخلی) را با رابطه زیر بیان می کند[۴]:

 $K = G_{\max} \left[S_{u1}(a_0, v, \beta) + i S_{u2}(a_0, v, \beta) \right]$

 S_{u1} حداکثر مدول برشی خاک بوده و نحوه تغییرات G_{max} و S_{u2} که تابعی از ضریب پواسون (v) و فرکانس بدون بعد بارگذاری $R/V_s = a_0 = a_0$ می باشند (w: سرعت زاویه ای بارگذاری و V_s : سرعت موج برشی در خاک) در [۴] و مطابق شکل (۲) ارائه گردیده است.



شکل۲: نحوه تغییرات پارامترهای S_{u1} و S_u2 برحسب فرکانس بدون بعد[۴] .

قسمت حقیقی رابطه ۲ بیانگر سختی استاتیکی و قسمت موهومی بیانگر میرایی تابشی (۲۰) می باشد.لازم به ذکر است که میرایی تابشی در واقع مدل کننده انتشار انرژی به خارج از محدوده مدل و به عبارتی مدل کننده محیط

تعیین کننده می باشند. در این میان مقدار جرم با توجه به چگالی خاک قابل دستیابی بوده و لیکن مقادیر دو پارامتر دیگر می بایست با توجه به رفتار غیر خطی خاک بصورت دقیق تعیین گردند. از آنجایی که سازه مونوپایل تحت بار جانبی بالایی واقع می گردد، در محدوده ای از اطراف آن رفتار خاک کاملا غیر خطی گشته و با فاصله گرفتن از بدنه مونوپایل این رفتار به سمت رفتار خطی پیش میرود. بهمین منظور برای مدلسازی رفتار دقیق خاک مناسبتر است تا محیط خاکی با دو محدوده مجزا مطابق شکل (۱) مدلسازی گردد.



شکل1: تقسیم بندی محیط خاکی به محدوده داخلی و خارجی [2] .

باتوجه به شکل در این مطالعات برای محدوده داخلی $M_n = M_1 + M_2$ و حرم $M_n = M_1 + M_2$ در نظر \mathcal{R}_n شده و برای محدوده خارجی سختی \mathcal{K}_n میرایی \mathcal{C}_r لحاظ گردیده است. بدیهی است برایند سختی ها مطابق رابطه ۱ می بایست مبین سختی معادل خاک باشد. لازم مختلف فنر و کمک فنر (موازی و سری)، الگوی ارائه شده در شکل فوق را تأیید کرده[۱] و Elnaggar & Novak در مدلسازیهای خود از آن بهره گرفته اند[۲].

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_L} + \frac{1}{K_{nL}}$$
(1)

سختی معادل

مناسبترین روش برای تعیین سختی معادل خاک استفاده از منحنی های P-y می باشد. از آنجایی که این منحنی ها بر اساس اندازه گیریهای واقعی بدست آمده اند قادر به ارائه مقاومت جانبی خاک بصورت قابل قبول و مناسبی بوده و بهمین منظور در آیین نامه های طراحی استفاده از این روش برای تحلیل رفتار غیر خطی خاک

بینهایت بوده و بهمین منظور در محدوده خارجی اعمال می گردد. از روابط دیگر می توان به روابط γe^{4} که به ترتیب توسط Berger etal و Gazetas & Dobry ارائه شده است اشاره نمود[۱۰]. در این رابطه $V_{\rm s}$ و $V_{\rm p}$ بترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج طولی در خاک بوده و $\rho_{\rm s}$ مبین چگالی خاک می باشد.

$$C_r = 4R\rho_s(V_s + V_p)$$

(٣)

$$C_r = 4R\rho_s V_s \left\{ 1 + \left[\frac{3.4}{\pi(1-\nu)} \right]^{\frac{5}{4}} \right\} \left\{ \frac{\pi}{4} \right\}^{\frac{3}{4}} a_0^{-\frac{1}{4}}$$

(۴)

با توجه به این امر که مقدار میرایی تابشی متأثر از فرضیات ساده کننده در مورد نحوه پخش موج در توده خاکی است، در شکل (۳) این فرضیات بصورت مستقل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میگردد بعلت جامعیت بیشتر روش Novak این روش در تحلیلها انتخاب گردیده است.

رابطه دیگری توسط Nogami & Konagai برای سختی و میرایی محدوده خارجی مطابق شکل (۴) و رابطه ۵ ارائه شده است[۵] . در این روابط G مدول برشی خاک بوده و مقادیر پارامترهای $_{\lambda}{Z}$ و $_{m}{Z}$ برحسب ضریب پواسون در مقاله آنها مشخص گردیده است. از آنجایی که این مدل تنها در محدوده فرکانسی 0.2 $<a_0$ <0.2 (زمانهای بارگذاری کم) صادق است، لذا در این مطالعات کاربرد ندارد.



شکل ۳: مدلهای مختلف ارائه شده برای میرایی تابشی.





$$(k_1, k_2, k_3) = G\xi_k(v)(3.518, 3.518, 5.529)$$
$$(C_1, C_2, C_3) = G\xi_k(v)(113.0973, 25.133, 9.362)$$
$$(\Delta)$$

سختی و میرایی محدوده داخلی

مقدار میرایی محدوده داخلی با توجه به تغییر شکل خمیری در این محدوده برابر میرایی مصالح بوده که مقدار آن بستگی به مشخصات مصالح خاکی داشته و مشخص است، لیکن برای تعیین مقدار سختی غیر خطی دو روش زیر موجود است. اول استفاده از منحنی های P-y بدین ترتیب که با داشتن سختی معادل خاک و نیز سختی محدوده خارجی، سختی محدوده داخلی با توجه به رابطه ۱ قابل حصول است و دوم استفاده از رابطه مستقیمی است که توسط (Novak & Sheta(1980) ارائه گردیده است[۶].

$$K_{n} = \frac{8\pi G(1-\nu)(3-4\nu)\left[\left(\frac{R_{1}}{R}\right)^{2}+1\right]}{\left(\frac{R_{1}}{R}\right)^{2}+(3-4\nu)^{2}\left[\left(\frac{R_{1}}{R}\right)^{2}+1\right]Ln(\frac{R}{R_{1}})-1}$$

در این رابطه نسبت R/R₁ بستگی به درجه غیر خطی بودن خاک داشته و بین ۱/۱ الی ۲/۰ متغیر است.(R: شعاع محدوده داخلی – R₁: شعاع مونوپایل) بدیهی است با توجه به دقت منحنی های P-y و تطابق آنها بر مقادیر واقعی استفاده از روش اول مناسبتر بوده و لذا از این روش در مدلسازی استفاده گردید.

تئوری منحنی P-y دینامیکی

(6)

با مشخص بودن مشخصات بارگذاری، جنس خاک و قطر مونوپایل (D) ، می توان یک سختی معادل برای کل مجموعه فنر و میراگر محدوده داخلی و خارجی بگونه ای استخراج نمود که قابل جایگزین شدن با کل مجموعه

باشد. این امر توسط Elnaggar & Bentley و مطابق رابطه زیر ارائه گردید[۷].

$$P_{d} = P_{s} \left[\alpha + \beta a_{0}^{2} + \kappa a_{0} \left(\frac{\omega y}{D} \right)^{n} \right] \leq P_{u}$$
(Y)

در این رابطه Ps مقاومت نهایی خاک در حالت استاتیک و به ازای تغییر مکان جانبی y (برابر با مقادیر حاصله از منحنی های P-y) بوده و Pd مقاومت جانبی خاک در شرایط بارگذاری دینامیکی با سرعت زاویه ای ω می باشد. پارامترهای α و β و π پارامترهای کالیبراسیون می باشند که در [Y] مقادیر آنها ارائه شده است.

روند مدلسازی خاک در نرم افزار Ansys

با توجه به توضیحات مطروحه از روش منحنی های P-y دینامیکی در مدلسازیها استفاده گردید. با توجه به این امر که شکل این منحنی تابعی از مشخصات بارگذاری بوده و عملا قبل از تحلیل مدل برخورد کشتی به سازه مونوپایل مدت زمان برخورد و به عبارتی فرکانس زاویه ای بارگذاری مشخص نمی باشد، مقاومت خاک با سعی و خطا حاصل میگردد.

در نرم افزار Ansys به منظور مدلسازی خاک از المان Combin39 استفاده گردید و رفتار آن مطابق شکل (۵) بگونه ای تنظیم شد که در حالت باربرداری و به عبارتی وقوع کشش در خاک مقاومت خاک به صفر رسیده و با بارگذاری مجدد به مقدار اولیه بازگردد. با توجه به این امر پدیده جداشدگی قابل مدلسازی می باشد. همچنین به منظور مدلسازی خاک تحت کشش در دو طرف المان مونوپایل از المان غیر خطی Combin39 استفاده گردید.





مدلسازی کشتی

برای مدلسازی کشتی روشهای متداول، روشهای آماری، روشهای تجربی و استفاده از مدلهای ریاضی موجود می باشد که با توجه به عدم وجود اطلاعات اندازه گیری شده که مبنایی بر استفاده از روشهای آماری و نیز کالیبراسیون مدلهای ریاضی است، در این مقاله از روشهای متداول استفاده میگردد. بر اساس این روش کشتی با سرعت V و تناژ DT انرژی هنگام برخورد با خود حمل میکند که این مقدار از انرژی هنگام برخورد با سازه در اثر پارامترهای مختلفی که تابعی از شرایط پهلوگیری می باشند افزایش و یا کاهش می یابد. در نهایت مقدار سهمی از انرژی کشتی که می بایست توسط سازه جذب گردد و به عبارتی سرعت کشتی را از مقدار V به صفر برساند برابر است با:

$$E_{t} = \frac{M'}{2g}V^{2}$$
$$M' = DT \times C_{e} \times C_{c} \times C_{s} \times C_{m}$$

(λ)

در این رابطه Ce ,Cn ,Cc ,Cs ضرایب تصحیح مقدار انرژی پهلوگیری بوده و بترتیب ضریب نرمی (اثر تغییر شکل بدنه کشتی)، ضریب چیدمان (اثر شکل سازه)، ضریب جرم افزوده (اثر آب شتاب گرفته در اثر حرکت کشتی) و ضریب خروج از مرکزیت (اثر دوران کشتی منگام پهلوگیری) می باشند. با توجه به تعریف ضرایب می توان مشاهده نمود که تنها پارامتر Cm بالاتر از یک می توان مشاهده نمود که تنها پارامتر m بالاتر از یک بوده و تأثیر بقیه پارامترها در جهت کاهش انرژی می باشد. مقادیر ضرایب مذکور در اکثر آیین نامه ها بطور بدین ترتیب استفاده میشود که کشتی توسط المان بدین ترتیب استفاده میشود که کشتی توسط المان بداظ می گردد. بدیهی است شرایط اولیه اجرای مدل طراحی شده، شرایطی است که این جرم از سازه جدا بوده و با سرعت V به آن نزدیک میگردد.

مدلسازي فندر

با توجه به لزوم جذب انرژی بالا در سازه مونوپایل، در این سازه می بایست از فندر با حداکثر کارایی (نسبت جذب انرژی به عکس العمل فندر ماکزیمم باشد) استفاده نمود. در این مقاله فندر های SCN از

محصولات Fentek [۹] با توجه به کارایی مناسب انتخاب گردیدند. با مشخص بودن نمودار عملکرد فندر (منحنی نیرو- تغییر مکان) امکان مدلسازی آن از طریق المان Combin39 مهیا میگردد و برای اعمال رفتار الاستیک، رفتار المان مذکور به گونه ای مدل میگردد که مسیر باربرداری منطبق بر مسیر بارگذاری باشد. از طرفی لازم است تا بین المان کشتی و المان فندر المانهای تماسی بگونه ای معرفی گردند که هنگام برخورد، انتقال نیرو از کشتی به فندر روی داده و پس از جدا شدن این دو المان، مقدار نیروی عمل و عکس العمل بین آندو صفر گردد. برای مدلسازی این پدیده از المانهای Target و کریده استاده گردیده است.

مدلسازی شمع و آب مجاور آن

آب مجاور سازه را میتوان به دو گروه آب داخل سازه و آب خارج سازه تقسیم بندی نمود. تأثیر گروه اول تنها بر ماتریس جرم بوده و با مشخص بودن چگالی آب قابل اعمال است در حالی که گروه دوم علاوه بر ماتریس جرم ماتریس میرایی را نیز متأثر میسازد. برای در نظر گرفتن آب اطراف سازه رابطه ای تجربی و بسیار متداول توسط Morison بصورت زیر ارائه گردیده است:

$$F = C_D \rho_w \frac{D}{2} |V - u| (V - u) + C_M \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \mathring{V} - (C_m - 1) \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \mathring{u}$$
(9)

C منافر این رابطه نیروی وارده بر واحد طول مونوپایل با قطر D از دو بخش نیروی دراگ (متناظر با میرایی و سرعت) و نیروی اینرسی(متناظر با جرم و شتاب) تشکیل گردیده است. در نرم افزار ما جرم و شتاب) تشکیل گردیده است. در نرم افزار ما جرم و شتاب) تشکیل گردیدو $(\dot{u} \ u)$ امکانپذیر می باشد. در این نرم افزار با توجه به تکنیک حل مکانپذیر می باشد. در این نرم افزار با توجه به تکنیک حل مکانپذیر می باشد. در این نرم افزار با توجه به تکنیک و $(\dot{u} \ u)$ و شتاب سازه ($\dot{u} \ e$) معادیر سرعت و شتاب سازه ($\dot{u} \ e$) و $(\dot{u} \ e)$ معادیر سرعت و شتاب سازه ($\dot{u} \ e$) محاسبه گشته و با مشخص بودن سرعت و شتاب سازه ($\dot{u} \ e$) معادی بر سازه در هر گام زمانی محاسبه گشته و با مشخص بودن سرعت و شتاب سازه ($\dot{u} \ e$) معادی بر مازه در هر گام زمانی محاسبه گشته و با مشخص بودن سرعت و مناب میروی اعمالی بر سازه مونوپایل مشخص میگردد. ضرایب m و $(m) \ e$ محالی جریان از مراب میدولدز، عدد کلوگان-کارپنتر، زبری و غیره جمله عدد رینولدز، عدد کلوگان-کارپنتر، زبری و غیره دارند که در این میان تأثیر عدد رینولدز بیش از بقیه پارامترها می باشد. این ضرایب را میتوان بصورت عددی پارامترها می باشد. این ضرایب را میتوان بصورت عددی

ثابت و یا تابعی از عدد رینولدز در نرم افزار Ansys معرفی نمود. نتایج حاصله از تحلیلها حاکی از تأثیر ناچیز حضور آب در اطراف سازه حتی در شرایط اعمال حداکثر مقادیر این ضرایب دارد (حداکثر مقادیر محتمل برای ضرایب و C_D و C_D بترتیب برابر ۲٫۰ و ۲٫۰ است که متناسب با C_m اعداد رینولدز پائین میباشد [۳]). برای تحقیق این مطلب مدلی سه بعدی مطابق شکل (۶) در محیط نرم افزار Ansys و با بهره گیری از المانهای Fluid ساخته شد که نتایج خروجی مدل مبتنی بر تغییر حداکثر ممان در طول سازه نسبت به زمان در دو حالت حضور و عدم حضور آب مطابق شکل (۷) حاکی از صحت ادعای فوق می باشد بگونه ای که با حضور آب ممان بوقوع پیوسته در پای شمع بصورت ناچیز و در حدود حداکثر ۵ درصد کاهش می یابد. در این مثال نمودار سهموی انتقال نیرو با پذیرش درصدی خطا بصورت بار مثلثی تخمین زده شده است.



شکل ۶ : مدل ساخته شده در محیط Ansys جهت مدلسازی حضور آب مجاور سازه (نصف مدل).



شکل ۷ : لنگر در پای شمع در دو حالت حضور و عدم حضور آب.

۵۷۵

حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف

با اجرای مدل تحت شرایط متنوع تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد جانبی مونوپایل قابل بررسی است. از آنجایی که هنگام برخورد کشتی، نمودار اعمال و یا انتقال نیرو از کشتی به سازه نسبت به زمان حالتی سهموی داشته و یا به عبارتی از اولین لحظه تماس کشتی با سازه مونوپایل، مقدار نیروی اعمالی به این سازه از صفر تا حد مشخصی افزایش یافته و سپس با همان روند کاهش می یابد، در مقایسه نمودارها لحظه وقوع حداکثر مقادیر مدنظر خواهد بود.

تأثیر جرم کشتی و سرعت پهلوگیری

با توجه به سرعتهای معمول برخورد کشتی سرعت ۱۰Cm/s انتخاب گردید وکشتی های با تناژ مختلف (۲۵۰،۲۰۰،۶۰۰ هزار تنی) به عنوان کشتی پهلوگیرنده به مدل معرفی گردیدند. از طرفی برای بررسی تأثیر تغییر سرعت در رفتار سازه مونوپایل، کشتی ۱۰۰ هزار تنی با سرعتهای برخورد مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در حالت دوم سرعتها بگونه ای انتخاب گردیدند که میزان انرژی حاصله مساوی میزان انرژی مربوط به تناژهای متنوع کشتی در حالت اول باشد. به عنوان مثال انرژی کشتی ۶۰ هزار تنی با سرعت ۱۰ سانتیمتر بر ثانیه معادل انرژی کشتی ۱۰۰ هزار تنی با سرعت ۸ سانتیمتر بر ثانیه می باشد. اشکال (۸) و (۹) بترتیب حداکثر تغییر مکان و لنگر اتفاق افتاده را در طول سازه مونوپایل در شرایط مذکور نشان میدهند. با توجه به این اشکال می توان مشاهده نمود که به ازای یک انرژی برخورد ثابت (مثلاً مثال مذکور در بالا) نمودارهای ماکزیمم کاملاً بر هم منطبق می باشند. این امر تصدیقی بر روشهای کنونی و استفاده از مفهوم انرژی برای طراحی اسکله های پهلوگیری می باشد (به عبارت دیگر دو پارامتر تناژ و سرعت برخورد را می توان با یک پارامتر انرژی در طراحیها معادل سازی نمود).

لازم به ذکر است که علیرغم تساوی بین حداکثر تغییر مکان و لنگر، با افزایش تناژ کشتی در سرعت ثابت، مدت زمان پهلوگیری با روند سریعتری نسبت به افزایش سرعت در تناژ ثابت افزایش می یابد. این امر در شکل (۱۰) مشخص می باشد. در این شکل محور افقی مقدار انرژی بوده و محور قائم مدت زمان برخورد را نشان می دهد.

توجه به این نکته ضروریست که نتایج حاصله مختص به یک شرایط خاص بوده و به عنوان مثال با کاهش تناژ کشتی تأثیر تغییر سرعت بر مدت زمان پهلوگیری افزایش خواهد داشت.



شکل ۸: توزیع تغییر مکان در طول شمع به ازای سرعت و



تأثير قطر مونوپايل

با افزایش قطر مونوپایل سختی جانبی آن افزایش یافته و متعاقباً تغییر مکان جانبی مونوپایل کاهش می یابد. با توجه به کاهش تغییر مکان جانبی و کاهش جذب انرژی توسط مونوپایل بدیهی است که مابه التفاوت انرژی،

توسط فندر جذب گردد که این امر منجر به افزایش نیروی عکس العمل فندر و در نتیجه افزایش ممان در طول مونوپایل می گردد. نحوه توزیع تغییر مکان و لنگر در طول مونوپایل در لحظه وقوع حداکثر مقادیر و به ازای اقطار مختلف در اشکال (۱۱) و (۱۲) مشخص گردیده است.



شکل ۱۱: توزیع تغییر مکان جانبی در طول شمع به ازای اقطار مختلف شمع.

تأثير نوع فندر

با افزایش رده فندر به ازای نیروی ثابت میزان جذب انرژی فندر کاهش یافته و لذا سهم جذب انرژی مونوپایل افزایش می یابد. این امر همراه با افزایش تغییر مکان مونوپایل می باشد که آن نیز مستلزم افزایش عکس العمل فندر و به عبارتی افزایش میزان جذب انرژی فندر می باشد. در واقع تعادلی بین انرژی جذب شده توسط فندر و مونوپایل بگونه ای برقرار می گردد که مجموع آندو

برابر انرژی کشتی باشد. افزایش بیش ازحد رده فندر باعث عدم استفاده از تمامی ظرفیت آن گشته و کاهش بیش از حد آن نیز گسیختگی را بهمراه خواهد داشت.



شکل ۱۲: توزیع لنگر در طول شمع به ازای اقطار مختلف شمع.

با توجه به توضیحات فوق رده فندر باید حتی الامکان پایین باشد تا تغییر مکان و ممان در طول مونوپایل کاهش یافته و نیز در حدی نباشد که گسیخته گردد. توزیع تغییر مکان و ممان در طول سازه مونوپایل در لحظه وقوع حداکثر مقادیر در اشکال (۱۳) و (۱۴) به ازای بکارگیری فندر های مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میگردد فندر با رده ۱۰۰۰ بهینه ترین فندر بوده و با افزایش رده فندر به حالتی پایدار می رسیم. لازم به ذکر است که افزایش رده فندر تأثیر چندانی بر مدت زمان پهلوگیری ندارد.

تأثير عمق آب

با افزایش عمق آب و متعاقباً افزایش بازوی لنگر، ممان حداکثر در مقطع مونوپایل و نیز تغییر مکان متناظر با آن افزایش یافته و همچنین مدت زمان پهلوگیری نیز افزایش می یابد. از طرفی با افزایش تغییر مکان مونوپایل انرژی جذب شده توسط آن افزایش یافته و لذا می توان از فندرهای با رده پایینتر استفاده نمود. شکل (۱۵) تغییر مکان در طول مونوپایل را به ازای اعماق مختلف آب نشان می دهد.



شکل ۱۶: توزیع تغییر مکان جانبی در طول شمع به ازای اعماق نفوذ مختلف.

برای درک بهتر موضوع، نمودار توزیع شیب پروفیل تغییر شکل یافته مونوپایل در لحظه وقوع حداکثر تغییر مکان در شکل (۱۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میگردد به ازای مقادیر نفوذ بالا مقدار شیب در اعماق زیاد خاک به سمت صفر میل می نماید که در واقع نشاندهنده براساس تئوری، با کاهش بیش از حد عمق نفوذ، الگوی گسیختگی به سمت گسیختگی کوتاه پیش رفته و از طرفی پس از یک عمق نفوذ مشخص، افزایش عمق کوبش تأثیری بر رفتار سازه مونوپایل نداشته و به حالتی پایدار می رسیم. برای تحقیق این مطلب اعماق نفوذ ۹، یایدار می رسیم. برای تحقیق این مطلب اعماق نفوذ ۹، کشتی و در لحظه وقوع حداکثر تغییر مکان، الگوی توزیع تغییر مکان در طول سازه مونوپایل مطابق شکل (۱۶)

گیردار بودن کامل مونوپایل بوده و عمق نفوذ ۱۵ متر میانگینی از رفتار شمع بلند و شمع کوتاه را نشان می دهد.



شکل ۱۷: توزیع شیب در طول شمع به ازای اعماق نفوذ مختلف.

تأثير نوع خاك

برای بررسی خاکهای مختلف طبقه بندی خاکها مطابق جدول (۱) صورت پذیرفت. در این طبقه بندی خاکهای ماسه ای و رسی با علائم S و C مشخص گشته و در هر گروه خاک سه درجه تراکم مختلف مدنظر قرار گرفته است.

طبقه ماسه	درجه تراكم	γ ' (KN/m ³)	Φ (°)
S1	غير متراكم	7	30
S2	نيمه متراكم	9	35
~			

جدول ۱: طبقه بندی خاکهای ماسه ای و رسی

S2	نيمه متراكم	9	35
S3	متراكم	11	45
طبقه رس	-	-	$C_u(KN/m^2)$
C1	غير متراكم	6	35
C2	نيمه متراكم	8	75
C3	متاكم	10	125

اشکال (۱۸) و (۱۹) حداکثر مقادیر لنگر و تغییر مکان بوقوع پیوسته در طول سازه مونوپایل را طی برخورد کشتی نشان می دهد. همانطور که مشاهده میگردد با افزایش تراکم خاک حداکثر لنگر در عمق کمـــتری روی

داده و همچنین میزان حداکثر آن و نیز تغییر مکان جانبی کاهش می یابد. از طرفی مطابق انتظار با کاهـــش تراکم خاک به عمق نفوذ بالاتری نیاز می باشد.



شکل۱۸: توزیع تغییر مکان جانبی در طول شمع به ازای خاکهای مختلف.



شکل ۱۹: توزیع لنگر در طول شمع به ازای خاکهای مختلف.

تأثیر ضرایب بار گذاری دینامیکی و مدت پهلوگیری همانطور که در بندهای قبلی اشاره گردید برای بیان رفتار دینامیکی خاک از اعمال ضریبی توصیه شده توسط ELNaggar بر منحنی های P-y استاتیکی استفاده به ازای انرژی پهلوگیری خاص تعیین نمود. در ادامه روند

گردید. این ضریب تابعی از مدت زمان برخورد، مقدار تغییر مکان جانبی و قطر مونوپایل بوده، بگونه ای که با کاهش مدت زمان برخورد مقدار ضریب افزایش یافته و با کاهش تغییر مکان جانبی و قطر شمع افزایش می یابد. از میان سه عامل مذکور تأثیر عومل دوم و سوم بسیار ناچیز و قابل صرفنظر کردن می باشد، لیکن مدت زمان برخورد نقشی اساسی در تعیین سختی دینامیکی خاک دارد. شکل (۲۰) مقدار ضریب دینامیکی را برای خاکهای رسی با درجه تراکمهای مختلف نشان می دهد. لازم به ذکر است که روند ارائه شده در این شکل برای خاکهای ماسه ای نیز صادق می باشد.



شکل ۲۰: تغییرات ضریب منحنی p-y دینامیکی نسبت به مدت زمان برخورد.

از آنجایی که مدت زمان معمول پهلوگیری کشتی های بزرگ (بیش از ۵۰ هزار تن) در حدود ۴۰ ثانیه می باشد، بر اساس شکل ارائه شده مشخص میگردد که ضریب تبدیل منحنی استاتیکی به منحنی دینامیکی در حدود عدد یک بوده و لذا با تقریب قابل قبولی (خطای کمتر از ۵ درصد)، میتوان از منحنی های P-y استاتیکی برای مدلسازی رفتار غیرخطی- دینامیکی خاک هنگام برخورد کشتی استفاده نمود.

منحنی های طراحی

در این قسمت با توجه به نتایج حاصله سعی می گردد تا روندی مناسب برای طراحی مونوپایل تحت اثر ضربه کشتی استخراج گردد. همانطور که اشاره گردید کشتی با تناژ و سرعت پهلوگیری مشخص را می توان با انرژی آن جایگزین نمود و در واقع مشخصات مونوپایل را

مورد نظر برای دستیابی به مشخصات مونوپایل ذکر می گردد. ۱- با توجه به سرعت پهلوگیری و تناژ کشتی، انرژی پهلوگیری (Et) از شکل (۲۱) بدست آید. ۲- با داشتن انرژی پهلوگیری تخمین اولیه ای از قطر شمع برای دو خاک ماسه ای و رسی بترتیب از اشکال (۲۲) و (۲۳) حاصل گردد. ۳- با مشخص بودن ممان اینرسی مقطع مونوپایل و (۳- با مشخص بودن ممان اینرسی مقطع مونوپایل و (M) با استفاده از روابط مقاومت مصالح بدست آید.

و (۲۵) نیروی متناظر در سر مونوپایل برای دو خاک ماسه ای و رسی (F) استخراج گردد.

۵- با استفاده از اشکال (۲۶) و (۲۷) تغییر مکان جانبی
 در سر مونوپایل برای دو خاک ماسه ای و رسی (Xp)
 استخراج گردد.

۶- با توجه به خطی بودن منحنی نیرو- تغییر مکان مونوپایل در محدوده های مجاز طراحی، انرژی جذب شده توسط مونوپایل معادل Ep=0.5F.Xp محاسبه گردد.

۷- با توجه به فندرهای موجود، فندری انتخاب گردد که ظرفیت مجاز فشاری آن F بوده و بدین ترتیب جذب انرژی آن (Ef) بدست آید.

۸- مجموع انرژی مونوپایل و فندر (Ep+Ef) با Et مقایسه گشته و در صورت عدم تساوی حدس جدیدی برای D انجام شده و مراحل ۳ به بعد تا رسیدن به قطر مناسب ادامه یابد، در غیر اینصورت قطر انتخاب شده مناسب می باشد.







لازم به توضیح است که توانهای بکار رفته در محور قائم اشکال به منظور دستیابی به یک منحنی واحد برای جمیع حالات می باشد که با روش سعی و خطا حاصل شده اند. از آنجایی که در استخراج منحنی های مذکور فرضیاتی در خصوص محدوده تغییرات پارامترها صورت پذیرفته، شناخت دقیق از آنها ضروری بوده و به عبارتی منحنی های استخراج شده برای محدوده خاصی مطابق جدول (۲) کاربردی و قابل استفاده می باشد.

جدول ۲ : دامنه مجاز تغییرات پارامترهای مؤثر بر منحنی های نماینده.

Φ (deg)	C (KN/m2)	h (m)	D (inch)
26-50	20-150	15-22	30-100

در این جدول پارامترها عبارتند از: h: عمق آب – D : قطر شمع – Φ : زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه ای – C : چسبندگی خاک رسی

نتيجه گيري

در این مقاله با توجه به کارایی فراوان و روز افزون مونوپایل و عدم وجود روشی مناسب برای طراحی آن سعی گردید تا منحنی هایی مناسب بگونه ای استخراج گردند که با مشخص بودن شرایط پهلوگیری (تناژ و سرعت پهلوگیری)، ابعاد هندسی سازه مونوپایل قابل مسرعت پهلوگیری)، ابعاد هندسی سازه مونوپایل قابل مسرعت پهلوگیری)، ابعاد هندسی از مونوپایل قابل ماهیت بارگذاری، مدلسازی دقیقی از رفتار دینامیکی-میر خطی خاک صورت پذیرفته و المانهای مؤثر دیگر از جمله اندرکنش آب-سازه (آب واقع در بیرون و درون سازه مونوپایل)، اندرکنش خاک-سازه، فندر و کشتی بصورت دقیق مد نظر قرار گرفتند. همچنین تأثیر هر یک از پارامترهای موجود بر عملکرد جانبی مونوپایل مد نظر قرار • با افزایش قطر مونوپایل تغییر مکان جانبی کاهش و

• با افزایش عمق آب تغییر مکان، لنگر و نیز مدت

با افزایش عمق نفوذ مونوپایل و همچنین با افزایش

بیش از حد رده فندر مصرفی، به حالتی پایدار می

• با توجه به مدت زمان پهلوگیری، با تقریب مناسبی

می توان از اثر رفتار دینامیکی خاک صرفنظر نمود.

لنگر در مقطع مونوپایل افزایش می یابد.

زمان پھلوگیری افزایش می یابد.

- گرفت. بر اساس نتایج حاصله:
- با افزایش تناژ و سرعت پهلوگیری کشتی، تغییر مکان و لنگر در طول مونویایل افزایش می یابد.
- پارامترهای تناژ و سرعت کشتی را میتوان با یک پارامتر تحت عنوان انرژی جایگزین نمود.
- با توجه به خطی بودن منحنی نیرو- تغییر مکان مونوپایل در محدوده های مجاز طراحی، انرژی جذب شده توسط مونوپایل معادل Ep=0.5F.Xp می باشد.
- برای کشتی های با تناژ بالا، تغییر تناژ کشتی نسبت به تغییر سرعت پهلوگیری تأثیر بیشتری بر تغییر مدت زمان پهلوگیری دارد.

مراجع

- Wang, S., Kutter, B. L., Chacko, M. J. and Wilson, D. W. (1998). "Nonlinear seismic soil-pile structure interaction." *The Professional J. of the Earthquake Eng.*, Research Ins., Vol. 14, No. 2.
- 2 Elnaggar, M. H. and Novak, M. (1996). "Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response." *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, Vol. 15, PP. 233-244.
- 3 API RP2A, (1993). Recommendation practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms.
- 4 Novak, M., Nogami, T. and Aboul-Ella, F. (1978). "Dynamic soil reaction for plane strain case." J. of the Engineering Mechanics Div., Vol. 104, PP. 953-959.
- 5 Nogami, T. and Konagai, K. (1988). "Time domain flexural response of dynamically loaded single piles." J. of Eng. Mechanics Div., ASCE, Vol. 114, PP. 1512-1525.
- 6 Novak, M. and Sheta, M. (1980). "Approximate approach to contact problems of piles." Proc. of Geotechnical Eng. Div., Dynamic Response of Pile Foundation, PP. 53-79.
- 7 Elnaggar, M. H. and Bentley, K. J. (2000). "Dynamic analysis for laterally loaded piles and dynamic P-y curves." *Canadian Geotechnical J.*, Vol. 37, PP. 1163-1183.
- 8 Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan, 2002.
- 9 Marine Fendering Systems, Copy right of fentek marine systems GmbH (Fentek Co.), 2001.
- 10 Gazetas, G. and Dobry, R. (1984). "Horizontal response of piles in layered soils." *J. of Geotechnical Eng., ASCE*, Vol. 110, No. 1, PP. 20-40.