

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)

چکیده

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 Ansys7.0 استفاده گردید و در نهایت با اتکا به نتایج حاصله روشی مناسب برای طراحی سازه مونوپایل استخراج شد.

واژه های کلیدی: مونوپایل، بار ضربه، رفتار غیر خطی، اندرکنش 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 پذیرفته 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 تحلیل 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 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

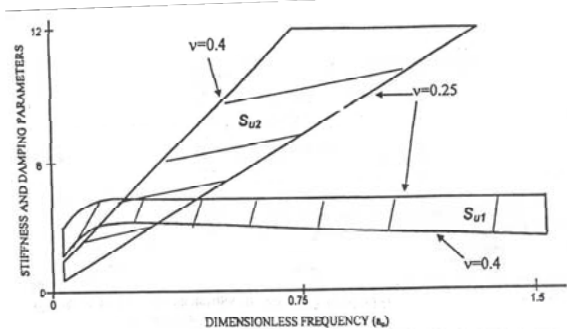
توصیه شده است [۳]. با توجه به تنوع و فراوانی منحنی های P-y (نیرو در واحد طول شمع- تغییر مکان جانبی) ضروریست جهت مدلسازی خاک از منحنی های استاندارد توصیه شده استفاده گردد، بهمین منظور برای مدلسازی خاک رسی از منحنی ارائه شده توسط Matlock و برای خاک ماسه ای از منحنی های ارائه شده توسط O'Neill استفاده گردیده 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

روابط متعددی برای بیان رفتار محدوده خارجی بسط یافته اند. Novak et al (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]:

$$K = G_{\max} [S_{u1}(a_0, \nu, \beta) + iS_{u2}(a_0, \nu, \beta)] \quad (2)$$

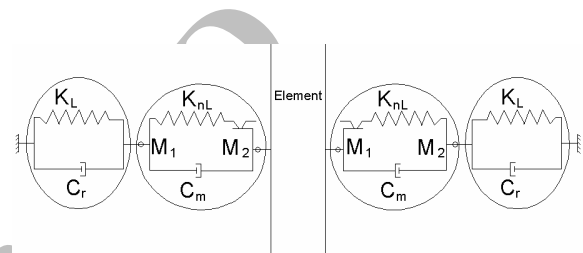
G_{\max} حداکثر مدول برشی خاک بوده و نحوه تغییرات S_{u1} و S_{u2} که تابعی از ضریب پواسون (ν) و فرکانس بدون بعد بارگذاری $a_0 = \omega R / V_s$ می باشند (ω : سرعت زاویه ای بارگذاری و V_s : سرعت موج برشی در خاک) در [۴] و مطابق شکل (۲) ارائه گردیده است.



شکل ۲: 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 (C_r) 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 کاملاً غیر خطی گشته و با فاصله گرفتن از بدنه مونوپایل این رفتار به سمت رفتار خطی پیش می رود. بهمین منظور برای مدلسازی رفتار دقیق خاک مناسبتر است تا محیط خاکی با دو محدوده مجزا مطابق شکل (۱) مدلسازی گردد.



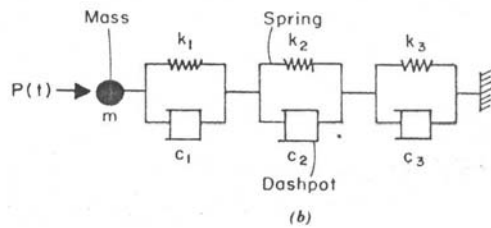
شکل ۱: تقسیم بندی محیط خاکی به محدوده داخلی و خارجی [۲].

باتوجه به شکل در این مطالعات برای محدوده داخلی سختی K_{nL} ، میرایی C_m و جرم $M_n = M_1 + M_2$ در نظر گرفته شده و برای محدوده خارجی سختی K_L ، میرایی C_r لحاظ گردیده است. بدیهی است براینست سختی ها مطابق رابطه ۱ می بایست مبین سختی معادل خاک باشد. لازم به ذکر است که Wang et al با مدلسازی چیدمان های 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].

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

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



شکل ۴: مدل ارائه شده توسط Nogami برای مدلسازی محدوده خارجی در محیط خاکی.

$$(k_1, k_2, k_3) = G \xi_k(v) (3.518, 3.518, 5.529)$$

$$(C_1, C_2, C_3) = G \xi_k(v) (113.0973, 25.1339, 362)$$

(۵)

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].

$$K_n = \frac{8\pi G(1-\nu)(3-4\nu) \left[\left(\frac{R_1}{R}\right)^2 + 1 \right]}{\left(\frac{R_1}{R}\right)^2 + (3-4\nu)^2 \left[\left(\frac{R_1}{R}\right)^2 + 1 \right] \ln\left(\frac{R}{R_1}\right) - 1}$$

(۶)

در این رابطه نسبت R/R_1 بستگی به درجه غیر خطی بودن خاک داشته و بین ۱/۱ الی ۲/۰ متغیر است. شعاع محدوده داخلی - R_1 : 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

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

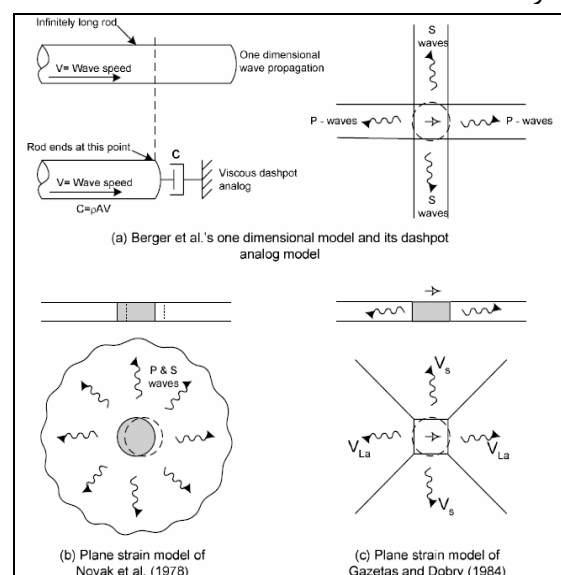
بینهایت بوده و بهمین منظور در محدوده خارجی اعمال می گردد. از روابط دیگر می توان به روابط ۳ و ۴ که به ترتیب توسط Berger et al و Gazetas & Dobry شده است اشاره نمود [۱۰]. در این رابطه V_p و V_s بترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج طولی در خاک بوده و ρ_s مبین چگالی خاک می باشد.

$$C_r = 4R\rho_s(V_s + V_p) \quad (۳)$$

$$C_r = 4R\rho_s V_s \left\{ 1 + \left[\frac{3.4}{\pi(1-\nu)} \right]^{5/4} \left\{ \frac{\pi}{4} \right\}^{3/4} a_0^{-1/4} \right\} \quad (۴)$$

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 k_m^* و k_k^* برحسب ضریب پواسون در مقاله آنها مشخص گردیده است. از آنجایی که این مدل تنها در محدوده فرکانسی $0.02 < a_0 < 0.2$ (زمانهای بارگذاری کم) صادق است، لذا در این مطالعات کاربرد ندارد.



شکل ۳: مدل‌های مختلف ارائه شده برای میرایی تابشی.

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 $E=0.5DT.V^2$ را 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:

$$E_t = \frac{M'}{2g} V^2$$

$$M' = DT \times C_e \times C_c \times C_s \times C_m \quad (8)$$

در این رابطه C_e, C_m, C_c, C_s 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 هنگام پهلوگیری) می باشند. با توجه به تعریف ضرایب می توان مشاهده نمود که تنها پارامتر C_m بالاتر از یک بوده و تأثیر بقیه پارامترها در جهت کاهش انرژی می باشد. مقادیر ضرایب مذکور در اکثر آیین نامه ها بطور تفصیل بحث شده است [۸]. از این مقادیر در مدلسازیها بدین ترتیب استفاده میشود که کشتی توسط المان Mass21 در نرم افزار Ansys معرفی و مقدار جرم آن M' لحاظ 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.

مدلسازی 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

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

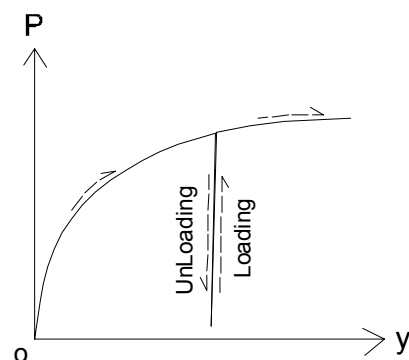
$$P_d = P_s \left[\alpha + \beta a_0^2 + \kappa a_0 \left(\frac{\omega y}{D} \right)^n \right] \leq P_u \quad (7)$$

در این رابطه P_s مقاومت نهایی خاک در حالت استاتیک و به ازای تغییر مکان جانبی y (برابر با مقادیر حاصله از منحنی های $P-y$) بوده و P_d مقاومت جانبی خاک در شرایط بارگذاری دینامیکی با سرعت زاویه ای ω می باشد. پارامترهای α و β و κ و n ، پارامترهای کالیبراسیون می باشند که در [۷] مقادیر آنها ارائه شده است.

روند مدلسازی خاک در نرم افزار Ansys

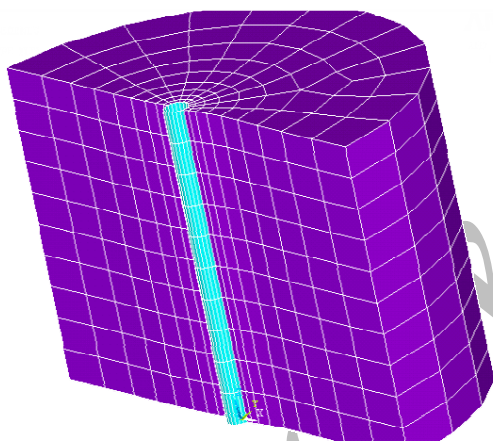
با توجه به توضیحات مطروحه از روش منحنی های $P-y$ دینامیکی در مدلسازیها استفاده گردید. با توجه به این امر که شکل این منحنی تابعی از مشخصات بارگذاری بوده و عملاً قبل از تحلیل مدل برخورد کشتی به سازه مونوپایل مدت زمان برخورد و به عبارتی فرکانس زاویه ای بارگذاری مشخص نمی باشد، مقاومت خاک با سعی و خطا حاصل 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 غیرخطی Combin39 استفاده گردید.

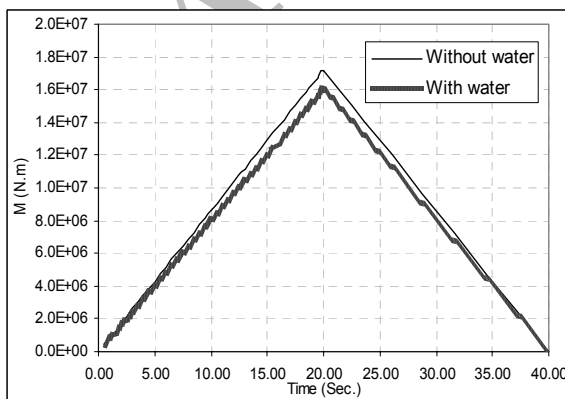


شکل ۵: منحنی رفتاری المان Combin39 هنگام تغییر جهت حرکت.

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 C_D و C_m بترتیب برابر ۲,۰ و ۱,۲ است که متناسب با 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 مثلی 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.

محصولات Fentek [۹] با توجه به کارایی مناسب انتخاب گردیدند. با مشخص بودن نمودار عملکرد فنر (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 فنر المانهای تماسی بگونه ای معرفی گردند که هنگام برخورد، انتقال نیرو از کشتی به فنر 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 Contact و Target در سطح تماس کشتی و فنر استفاده گردیده است.

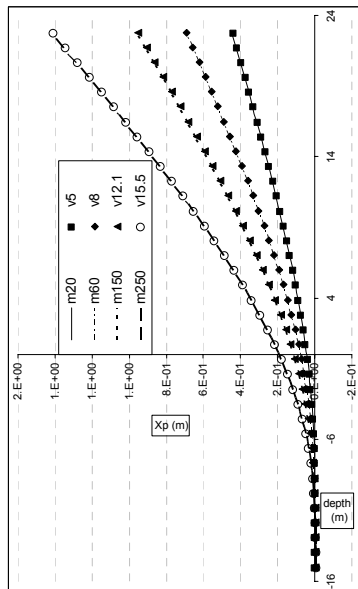
مدلسازی شمع و آب مجاور آن

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:

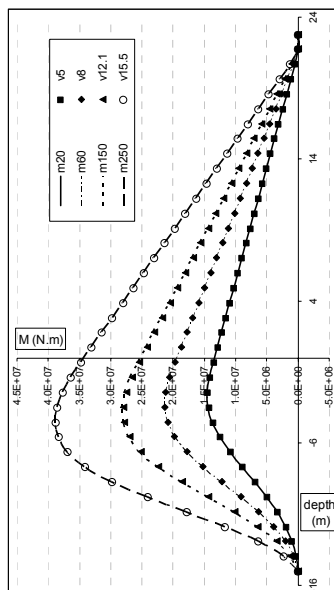
$$F = C_D \rho_w \frac{D}{2} |V - u| (V - u) + C_M \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \dot{V} - (C_m - 1) \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} \quad (9)$$

در 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 Ansys با بکارگیری قابلیت‌های المان Pipe59 لحاظ نمودن نیروی آب از طریق رابطه موريسون امکانپذیر می باشد. در این نرم افزار با توجه به تکنیک حل Newmark مقادیر سرعت و شتاب سازه (\dot{u} و u) در هر گام زمانی محاسبه گشته و با مشخص بودن سرعت و شتاب جریان (\dot{V} و V) مقدار نیروی اعمالی بر سازه مونوپایل مشخص میگردد. ضرایب C_D و C_m ضرایب اینرسی و دراگ بوده و بستگی به پارامترهای جریان از 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

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 جرم کشتی متفاوت.



شکل ۹: توزیع لنگر در طول شمع به ازای سرعت و جرم کشتی متفاوت.

تأثیر قطر مونوپایل

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،

حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف

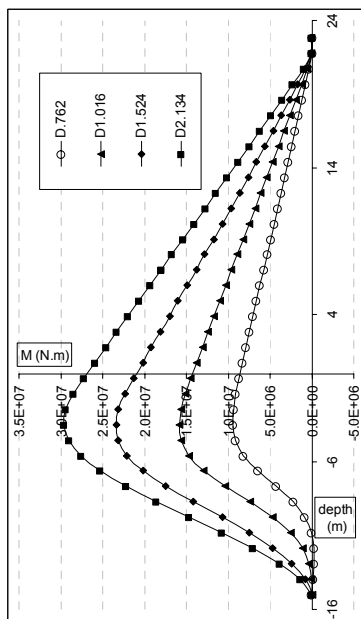
با اجرای مدل تحت شرایط متنوع تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد جانبی مونوپایل قابل بررسی است. از آنجایی که هنگام برخورد کشتی، نمودار اعمال و یا انتقال نیرو از کشتی به سازه نسبت به زمان حالتی سهموی داشته و یا به عبارتی از اولین لحظه تماس کشتی با سازه مونوپایل، مقدار نیروی اعمالی به این سازه از صفر تا حد 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 ۱۰ Cm/s انتخاب گردید و کشتی های با تناژ مختلف (۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ 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.

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



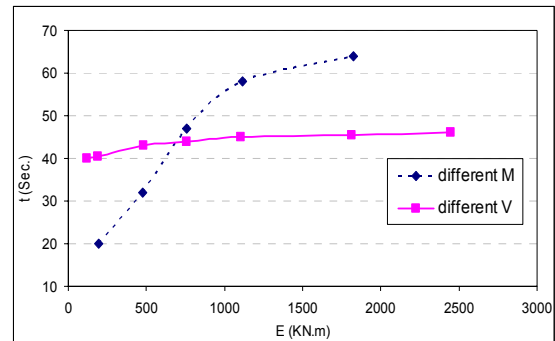
شکل ۱۲: توزیع لنگر در طول شمع به ازای اقطار مختلف شمع.

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 فندرهای 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 می‌رسیم. لازم به ذکر است که افزایش رده فندر تأثیر چندانی بر مدت زمان پهلوگیری ندارد.

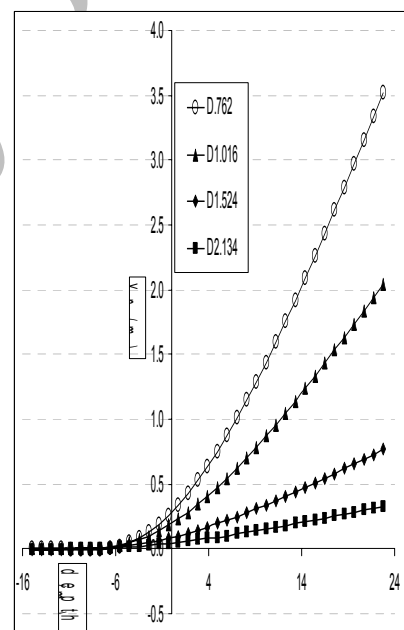
تأثیر عمق آب

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 می‌یابد. از طرفی با افزایش تغییر مکان مونوپایل انرژی جذب شده توسط آن افزایش یافته و لذا می‌توان از فندرهای با رده پایینتر استفاده نمود. شکل (۱۵) تغییر مکان در طول مونوپایل را به ازای اعماق مختلف آب نشان می‌دهد.

توسط فندر جذب گردد که این امر منجر به افزایش نیروی عکس العمل فندر و در نتیجه افزایش ممان در طول مونوپایل می‌گردد. 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: مدت زمان برخورد بر حسب انرژی پهلوگیری به ازای سرعت و جرم کشتی متفاوت.

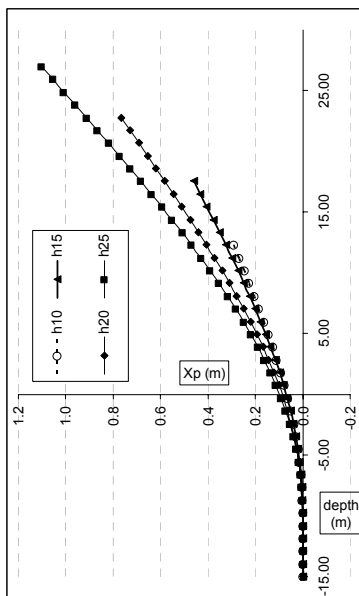


شکل ۱۰: توزیع تغییر مکان جانبی در طول شمع به ازای اقطار مختلف شمع.

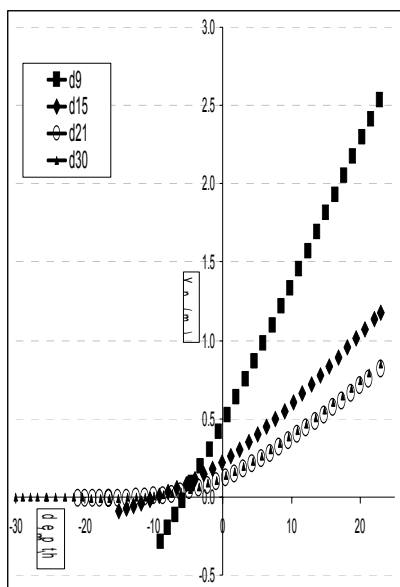
تأثیر نوع فندر

با افزایش رده فندر به ازای نیروی ثابت میزان جذب انرژی فندر کاهش یافته و لذا سهم جذب انرژی مونوپایل افزایش می‌یابد. این امر همراه با افزایش تغییر مکان مونوپایل می‌باشد که آن نیز مستلزم افزایش عکس العمل فندر و به عبارتی افزایش میزان جذب انرژی فندر می‌باشد. در واقع تعادلی بین انرژی جذب شده توسط فندر و مونوپایل بگونه‌ای برقرار می‌گردد که مجموع آندو

می گردد. بر اساس این شکل مونوپایل با عمق نفوذ ۹ متر گسیخته شده و مونوپایل‌های با عمق نفوذ ۲۱ و ۳۰ متر رفتار مشابهی را نشان می دهند که منطبق بر توضیحات فوق می باشد.

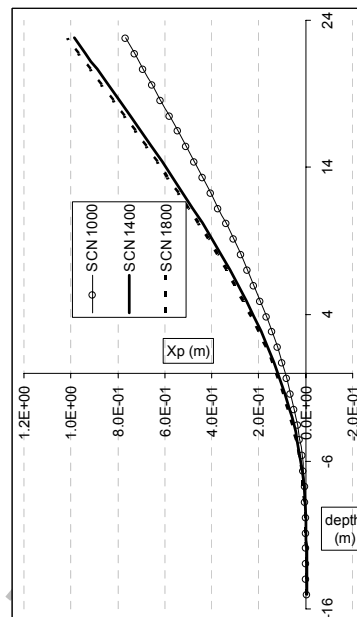


شکل ۱۵: توزیع تغییر مکان جانبی در طول شمع به ازای اعماق مختلف آب

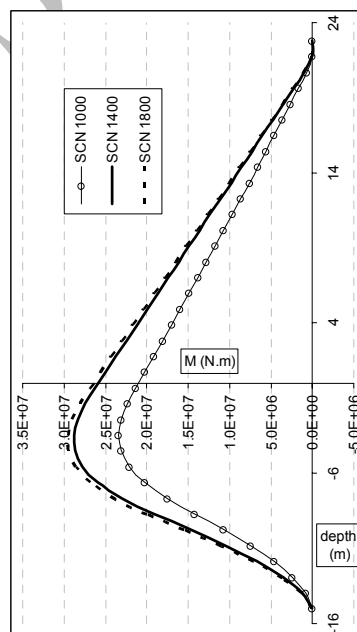


شکل ۱۶: توزیع تغییر مکان جانبی در طول شمع به ازای اعماق نفوذ مختلف.

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



شکل ۱۳: توزیع تغییر مکان جانبی در طول شمع به ازای فنرهای مختلف.

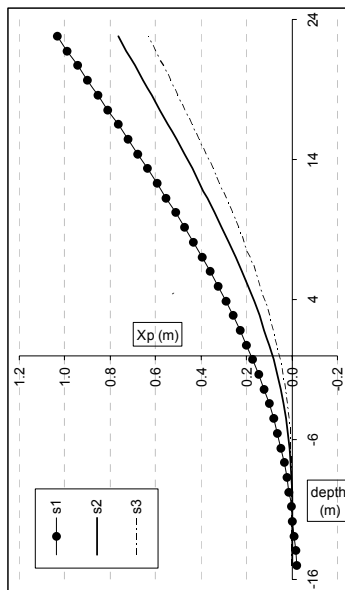


شکل ۱۴: توزیع لنگر در طول شمع به ازای فنرهای مختلف.

تأثیر عمق نفوذ مونوپایل

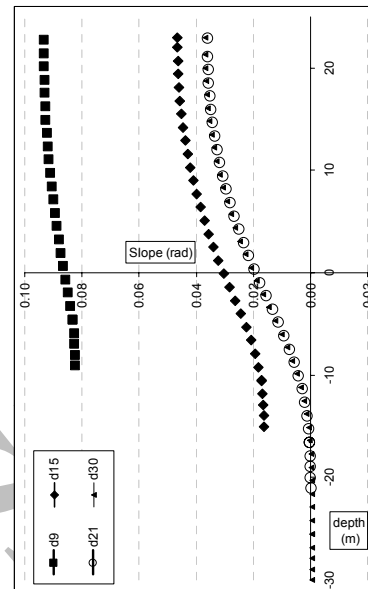
بر اساس تئوری، با کاهش بیش از حد عمق نفوذ، الگوی گسیختگی به سمت گسیختگی کوتاه پیش رفته و از طرفی پس از یک عمق نفوذ مشخص، افزایش عمق کوبش تأثیری بر رفتار سازه مونوپایل نداشته و به حالتی پایدار می رسیم. برای تحقیق این مطلب اعماق نفوذ ۹، ۱۵، ۲۱ و ۳۰ متر انتخاب گردیدند که در اثر برخورد کشتی و در لحظه وقوع حداکثر تغییر مکان، الگوی توزیع تغییر مکان در طول سازه مونوپایل مطابق شکل (۱۶)

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

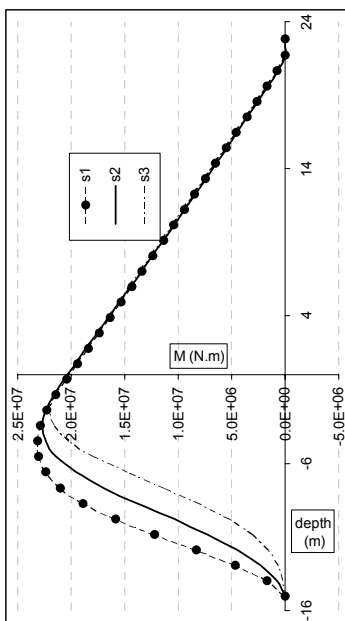


شکل ۱۸: توزیع تغییر مکان جانبی در طول شمع به ازای خاکهای مختلف.

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.



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

تأثیر نوع خاک

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.

جدول ۱: طبقه بندی خاکهای ماسه ای و رسی

طبقه ماسه	درجه تراکم	γ' (KN/m ³)	Φ (°)
S1	غیر متراکم	7	30
S2	نیمه متراکم	9	35
S3	متراکم	11	45
طبقه رس	-	-	C_u (KN/m ²)
C1	غیر متراکم	6	35
C2	نیمه متراکم	8	75
C3	متراکم	10	125

تأثیر ضرایب بارگذاری 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

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 کمتری روی

به ازای انرژی پهلوگیری خاص تعیین نمود. در ادامه روند 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 همچنین مقاومت تسلیم فولاد مصرفی لنگر مقاوم مقطع (M) با استفاده از روابط مقاومت مصالح بدست آید.

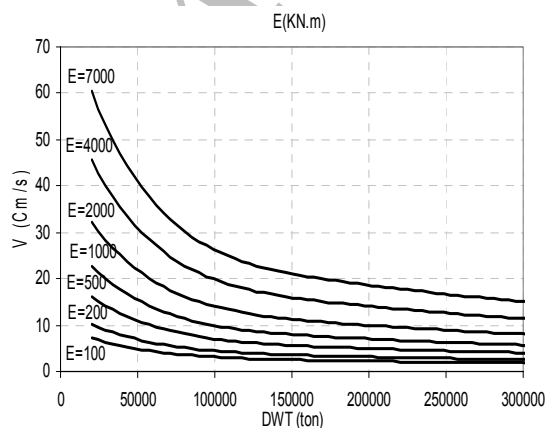
۴- با مشخص بودن لنگر مقاوم و استفاده از اشکال (۲۴) و (۲۵) نیروی متناظر در سر مونوپایل برای دو خاک ماسه ای و رسی (F) استخراج گردد.

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 $E_p = 0.5F \cdot X_p$ محاسبه گردد.

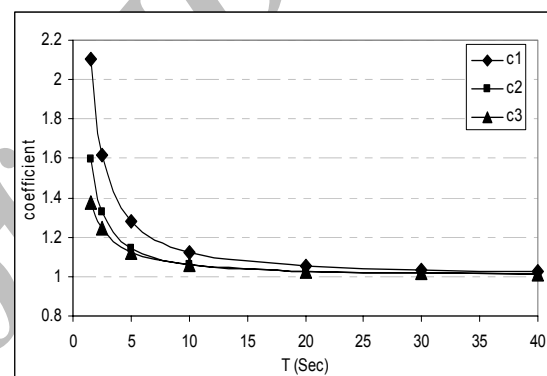
۷- با توجه به فنرهای موجود، فندری انتخاب گردد که ظرفیت مجاز فشاری آن F بوده و بدین ترتیب جذب انرژی آن (Ef) بدست آید.

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.



شکل ۲۱: انرژی پهلوگیری بر حسب جرم و سرعت برخورد کشتی.

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 عوامل دوم و سوم بسیار ناچیز و قابل صرف نظر 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.

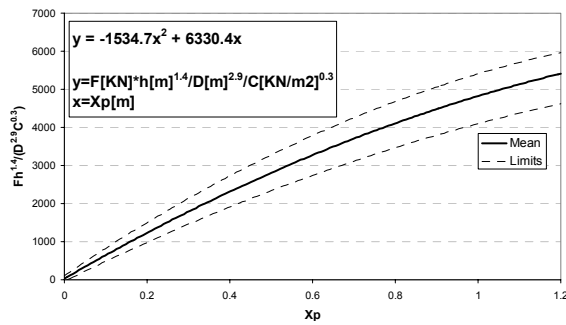


شکل ۲۰: تغییرات ضریب منحنی p-y دینامیکی نسبت به مدت زمان برخورد.

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



شکل ۲۷: منحنی نماینده رفتار جانبی شمع در خاک رسی.

لازم به توضیح است که توانهای بکار رفته در محور قائم اشکال به منظور دستیابی به یک منحنی واحد برای تمام 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.

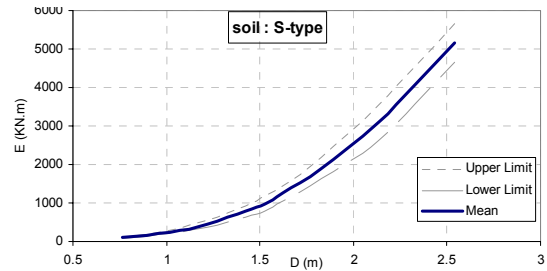
جدول ۲: دامنه مجاز تغییرات پارامترهای مؤثر بر منحنی های نماینده.

Φ (deg)	C (KN/m ²)	h (m)	D (inch)
26-50	20-150	15-22	30-100

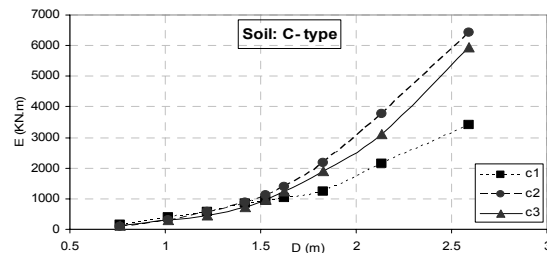
در این جدول پارامترها عبارتند از: h: عمق آب - D: قطر شمع - Φ : زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه ای - C: چسبندگی خاک رسی

نتیجه گیری

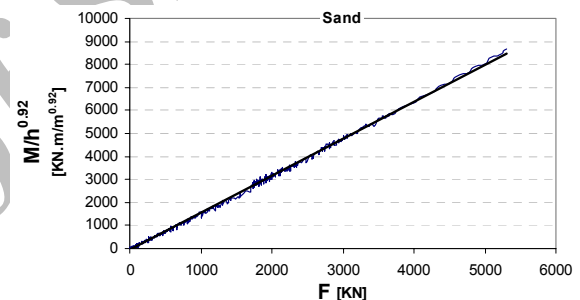
در این مقاله با توجه به کارایی فراوان و روز افزون مونوپایل و عدم وجود روشی مناسب برای طراحی آن سعی گردید تا منحنی هایی مناسب بگونه ای استخراج گردند که با مشخص بودن شرایط پهلوگیری (تناژ و سرعت پهلوگیری)، ابعاد هندسی سازه مونوپایل قابل حصول باشد. در این راستا و با توجه به دینامیکی بودن ماهیت بارگذاری، مدلسازی دقیقی از رفتار دینامیکی- غیر 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



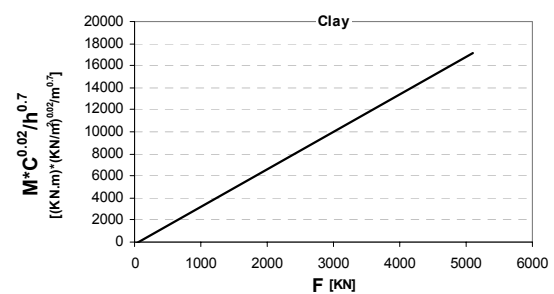
شکل ۲۲: انرژی پهلوگیری بر حسب قطر شمع برای خاک ماسه ای.



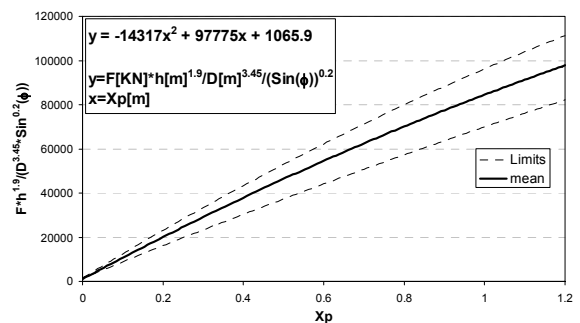
شکل ۲۳: انرژی پهلوگیری بر حسب قطر شمع برای خاک رسی.



شکل ۲۴: نمودار تغییرات نیرو بر حسب حداکثر تغییر مکان در خاک ماسه ای.



شکل ۲۵: نمودار تغییرات نیرو بر حسب حداکثر تغییر مکان در خاک رسی.



شکل ۲۶: منحنی نماینده رفتار جانبی شمع در خاک ماسه ای.

- گرفت. بر اساس نتایج حاصله:
- با افزایش تناژ و سرعت پهلوگیری کشتی، تغییر مکان و لنگر در طول مونوپایل 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 $E_p=0.5F.X_p$ می باشد.
- برای کشتی های با تناژ بالا، تغییر تناژ کشتی نسبت به تغییر سرعت پهلوگیری تأثیر بیشتری بر تغییر مدت زمان پهلوگیری دارد.
- با افزایش قطر مونوپایل تغییر مکان جانبی کاهش و لنگر در مقطع مونوپایل افزایش می یابد.
- با افزایش عمق آب تغییر مکان، لنگر و نیز مدت زمان پهلوگیری افزایش می یابد.
- با افزایش عمق نفوذ مونوپایل و همچنین با افزایش بیش از حد رده فندر مصرفی، به حالتی پایدار می رسیم.
- با توجه به مدت زمان پهلوگیری، با تقریب مناسبی می توان از اثر رفتار دینامیکی خاک صرف نظر نمود.

مراجع

- 1 - 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.