

پاسخ دینامیکی شمع تک در حالت شناور تحت اثر ارتعاش قائم

سارا دربندی^{۱*}، امین کشاورز^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، sara68_d@yahoo.com

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، amin_keshavarz@yahoo.com

چکیده

پایین‌ترین قسمت ساختمان، شالوده نامیده می‌شود. وظیفه شالوده انتقال بار ساختمان به خاک زیر آن است. زمانی که شالوده‌های سطحی تحت بار سنگین بوده و دچار نشست بیش از حد مجاز می‌شوند، از شالوده‌های عمیق از نوع شمع استفاده می‌شود. استفاده از شالوده‌های شمع سبب کاهش نشست پی‌های سطحی و افزایش ظرفیت باربری آن‌ها می‌شود. طراحی مناسب سازه‌های دارای تکیه‌گاه شمع نیازمند تحلیل دینامیکی مناسب فونداسیون‌های شمع است. در این مقاله، شمع تک با مقطع دایره‌ای و به صورت شناور تحت نیروی قائم، در نظر گرفته شده است و خاک نیز دارای رفتار الاستیک خطی و به سه حالت همگن، غیرهمگن خطی و غیرهمگن غیرخطی فرض شده است. با استفاده از نرم افزار اجزا محدود *COMSOL Multiphysics*، تغییرات سختی دینامیکی شمع در خاک ویسکوالاستیک تحت اثر تغییرات تعدادی از پارامترهای خاک و شمع با فرضیه‌های فوق، به دست آمده‌اند. مدلسازی به صورت دو بعدی تقارن محوری و در دامنه فرکانس انجام شده است و خاک و شمع کاملاً به هم متصل در نظر گرفته شده‌اند. نتایج دقت خوب مدل را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: شمع تک، نیروی قائم، همگن، غیرهمگن، خاک ویسکوالاستیک

۱- مقدمه

تا کنون محققان مطالعات زیادی برای تحلیل شمع‌ها انجام داده‌اند. توسعه مطالعات دینامیکی در مورد شمع از حدود چهار دهه پیش آغاز شده است. روش‌هایی که در ابتدا پیشنهاد شد برای تحلیل یک بعدی شمع تک در حوزه فرکانس بود. اما با توجه به تحقیقات گسترده‌ای که در این زمینه انجام شده و پیشرفت در امکانات محاسباتی، روش‌های پیچیده‌تری در طول زمان تکامل یافته‌اند. بیشتر نظریه‌های اخیر تعمیم یافته چند نظریه اساسی که قبلاً گسترش یافته‌اند، می‌باشد. در این فصل مروری مختصر بر تحلیل‌های دینامیکی مختلف برای شمع‌های تحت اثر نیروی محوری صورت گرفته است.

ونگ و همکاران [۱] پاسخ دینامیکی قائم شمع ویسکوالاستیک غیرهمگن که در خاک چند لایه قرار گرفته و تحت نیروی محوری می‌باشد را مورد بررسی قرار دادند. اندرکنش بین شمع و خاک توسط مدل جامع و ویت شبیه سازی شد، مدلی که توسط محققان اخیر نشان داده شد که قادر به ارائه حل کرنش صفحه ای خاک می‌باشد. آن‌ها راه حل‌های تحلیلی برای پاسخ شمع در دامنه فرکانس را با استفاده از تبدیل لاپلاس به دست آوردند. در تحلیل آن‌ها راه حل‌های نیمه تحلیلی متناظر در دامنه زمان، برای حالتی که شمع تحت اثر نیروی آنی نیم سینوسی که در نوک شمع وارد شده با استفاده از معکوس تبدیل فوریه به دست آمده‌اند. آن‌ها با استفاده از این تحلیل‌ها یک مطالعه پارامتریک بر روی تاثیر خصوصیات شمع و خاک بر پاسخ‌های دینامیکی قائم انجام دادند.

ژو و همکاران [۲] پاسخ دینامیکی شمعی که در نیم فضای اشباع قرار گرفته و تحت اثر نیروی قائم گذرا است را به دست آوردند. شمع توسط المان تیر نشان داده شد و برای خاک اشباع از تئوری سه بعدی بیوت استفاده شد. تحلیل‌های در دامنه زمان با استفاده از معکوس تبدیل فوریه سه بعدی به دست آمدند.

نوگامی و کوناگای [۳] در سال ۱۹۸۶ یک تحقیق بر روی تحلیل در دامنه زمان برای پاسخ محوری شمع ارائه دادند. در مدل آن‌ها نیروی اندرکنش در دامنه زمان شمع-خاک با استفاده از ایده آل سازی مکانیکی ساده خاک، فرمول سازی شده است. آن‌ها یک ماتریس انتقال در دامنه زمان را با در نظر گرفتن شمع به صورت تیر سراسری به دست آوردند. پاسخ شمع‌های تک تحت نیروی هارمونیک با استفاده از هر دو روش تحلیل در دامنه زمان و یک تحلیل در دامنه فرکانس که قبلاً توسط آن‌ها ارائه داده شده بود، به دست آمد.

نوگامی و کوناگای [۴] یک سال بعد یعنی در سال ۱۹۸۷ اثرات غیرخطی را در پاسخ عمودی شمع فرض کردند. برای نشان دادن ظرفیت فرمول‌های آن‌ها و برای مشاهده تاثیرات غیرخطی بر پاسخ دینامیکی شمع، پاسخ‌ها تحت اثر هردوی نیروهای هارمونیک و گذرا محاسبه شدند.

وو و همکاران [۵] پاسخ دینامیکی شمع با باربری نوک در خاک ویسکوالاستیک خطی با میرایی هیستریک را به صورت تئوری در نظر گرفتند و شمع را تحت اثر نیروی قائم در دامنه زمان در نوک آن در نظر گرفتند. خاک به صورت پیوسته، سه بعدی و متقارن فرض شد و هردو حالت جابجایی قائم و شعاعی در محاسبات برای آن در نظر گرفته شد. شمع به صورت قائم و با سطح مقطع یکنواخت دایره‌ای فرض شد. در تحلیل آن‌ها مطالعات پارامتریک برای بررسی تاثیر پارامترهای مهم سیستم شمع-خاک بر پاسخ ارتعاش قائم شمع انجام شد.

ژنگ و همکاران [۶] یک روش جدید برای به دست آوردن حل تحلیلی سختی محوری شمع با باربری نوک در خاک ویسکوالاستیک ارائه دادند. خاک به صورت یک لایه همگن و ایزوتروپیک فرض شد. معادلات حاکم بر خاک و شمع، با در نظر گرفتن جابجایی قائم و شعاعی برای خاک و ارتعاش همزمان خاک-شمع به دست آمدند.

آی و لیو [۷] یک روش جدید برای پاسخ دینامیکی شمع تک تحت اثر بار محوری که در خاک چند لایه ایزوتروپ قرار گرفته است، گسترش دادند. آن‌ها پاسخ دینامیکی شمع را تحت اثر ارتعاش یک بعدی و با فرض خاک به صورت چند لایه و ایزوتروپ با استفاده از روش المان لایه‌ای (*layer-element*) به دست آوردند. آن‌ها همچنین با استفاده از سازگاری جابجایی و تعادل نیروی تماسی در طول سطح تماس شمع-خاک، مساله اندرکنش دینامیکی شمع-خاک را حل کردند.

در این تحقیق پاسخ دینامیکی شمع تک در حالت شناور تحت اثر ارتعاش قائم با استفاده از روش اجزا محدود، بررسی شده است و همچنین تاثیر اینکه خاک اطراف شمع در سه حالت همگن، غیر همگن خطی و غیر همگن غیر خطی فرض شود، در پاسخ دینامیکی شمع مورد بررسی قرار گرفته شده است. این در حالی است که در تحقیقات پیشین تاثیر پارامترهای غیر خطی خاک در نظر گرفته نشده است.

۲- پارامترهای بررسی شده در مدل‌سازی شمع تک تحت اثر بار محوری

زمانی که شمع به صورت شناور فرض شود، متغیرهای فرکانس بی بعد (a_0)، سختی قائم شمع (K_z) که با روابط (۱) و (۲) تعریف شده‌اند، در محاسبات به کار رفته‌اند:

$$a_0 = a\omega\sqrt{\frac{\rho_s}{G_s}} \quad (1)$$

$$K_z = \frac{P}{uG_s r_0} \quad (2)$$

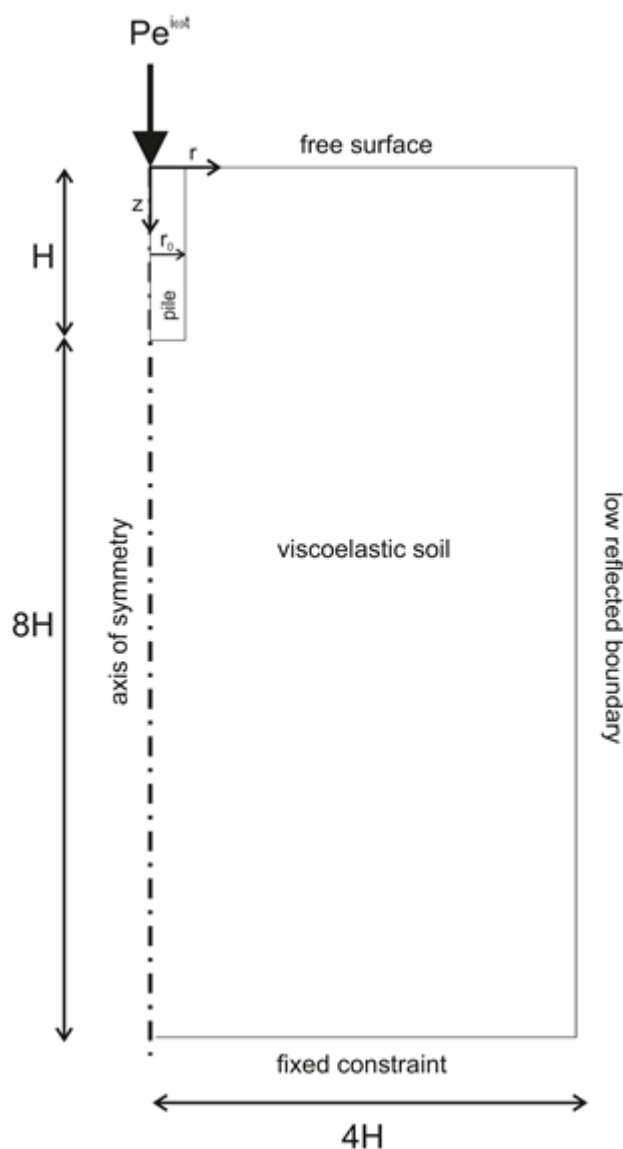
همچنین پارامترهای نسبت انعطاف پذیری $\bar{E} = \frac{E_p}{E_s}$ (مدول الاستیسیته شمع و E_s مدول الاستیسیته خاک)، نسبت طول

به شعاع شمع $\bar{h} = \frac{h}{r_0}$ (h ارتفاع شمع و r_0 شعاع شمع)، نسبت چگالی جرمی $\bar{\rho} = \frac{\rho_p}{\rho_s}$ (ρ_p چگالی شمع و ρ_s چگالی

خاک) برای تحلیل فرض می‌شوند و مقادیر $\bar{E} = 1000$ ، $\bar{\rho} = 1.2$ و $\bar{h} = 20$ برای این پارامترها فرض شده‌اند.

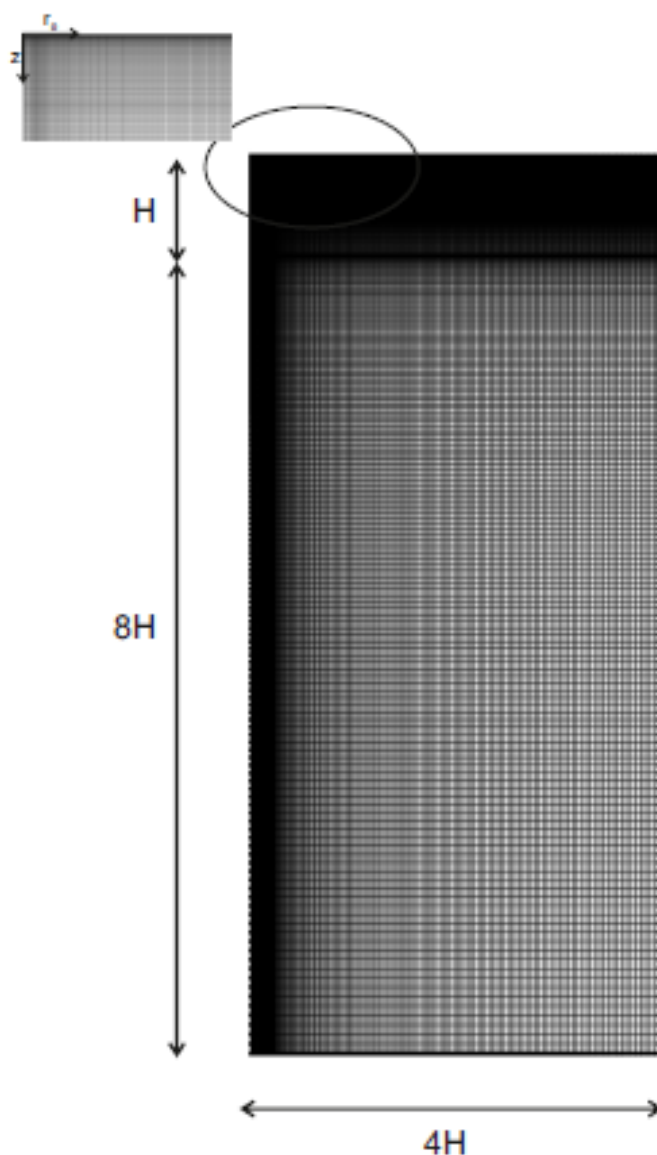
۳- مدل‌سازی شمع تک تحت بار محوری

هندسه مسئله و شرایط مرزی مربوط به شمع شناور در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، یک شمع الاستیک با شعاع a و طول h در یک فضای نیمه بینهایت ایزوتروپ قرار گرفته است و تحت اثر نیروی قائم در دامنه فرکانس در نوک شمع است. مرزی که برای کف مدل در نظر گرفته شده است مرز *fixed* است، مرز *fixed* به این منظور است که ته مدل نمی‌تواند آزاد باشد و باید مرزی به عنوان بستر برای آن در نظر گرفته شود. مرز در نظر گرفته شده برای خاک اطراف شمع، مرز *low reflected* است، این مرز نیز باعث می‌شود که امواج پس از برخورد به آن، خارج شوند و در خاک منعکس نشوند.



شکل ۱- مرزبندی شمع شناور تحت بار محوری

مش‌بندی شمع شناور در شکل ۲ نشان داده شده است. هرچقدر مش بندی ریزتر انتخاب شود، پاسخ حاصل از نرم افزار به حل‌های موجود نزدیکتر است. برای شمع شناور نیز مش تا حد امکان ریز انتخاب شده است و ریزتر در نظر گرفتن آن تاثیری در نتایج ندارد و پاسخی که با این مش بندی از نرم افزار به دست آمده است دقیق ترین حل است. به این معنی که اگر المان‌های مش بندی از آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است ریزتر در نظر گرفته شود، پاسخ‌ها تغییری نمی‌کنند.

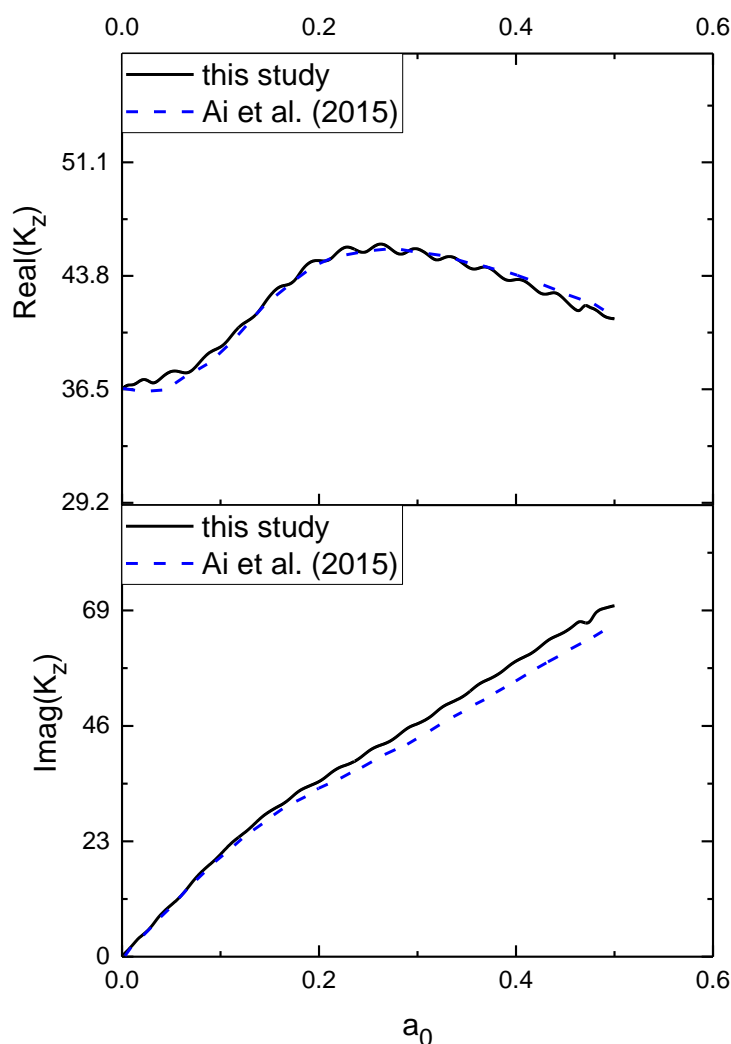


شکل ۲- مش بندی شمع شناور تحت بار محوری

۴- نتایج

۴-۱- شمع شناور در خاک همگن

در این بخش شمع به صورت شناور در خاک همگن فرض شده است. با استفاده از نرم افزار، نمودار قسمت حقیقی و موهومی سختی دینامیکی بر حسب فرکانس بی بعد a برای میرایی ۰,۲ رسم شده است. شکل ۳ نتایج به دست آمده از این تحلیل را برای خاک همگن نشان می‌دهد. برای بررسی صحت نتایج به دست آمده، سختی قائم به دست آمده از این تحلیل با حل آی و لیو [۷] مقایسه شده است. همانطور که در شکل مشخص است نتایج این دو حل به هم نزدیک هستند.



شکل ۳-مقایسه سختی قائم شمع شناور با حل آی و لیو [۷]

جدول ۱ مقایسه ای از سختی قائم برای شمع تک که در یک نیم فضای الاستیک قرار گرفته و تحت نیروی قائم خارجی در نوک شمع می‌باشد را برای تایید بیشتر دقت و صحت روش ارائه شده، نشان می‌دهد و همانطور که از جدول مشخص است نتایج کاملا به هم نزدیک هستند و این امر نشان دهنده صحت تحلیل انجام شده می‌باشد. داده های این جدول، نتیجه تحلیل در فرکانس $a_0 = 0.4$ با فرض $\bar{h} = 10$ ، $\bar{\rho} = 1$ و $\mu_s = 0.25$ به دست آمده اند.

جدول ۱: مقایسه سختی قائم شمع تک در نیم فضای الاستیک

\bar{E}	Zeng and Rajapakse[8]	Rajapakse and Shah[9]	Rajapakse[10]	Ai and Liu[7]	Present study
۱۰	(۱۴,۳۱ و ۸,۱۰)	(۱۴,۳۵ و ۸,۴)	(۱۴,۳۶ و ۸,۲۹)	(۱۴,۷۵ و ۸,۶۱)	(۱۴,۴۰ و ۸,۹۹)
۵۰	(۲۳,۱۷ و ۲۰,۰۸)	(۲۳,۱۶ و ۲۱,۳۱)	(۲۳,۲۰ و ۲۰,۸۹)	(۲۲,۸۷ و ۲۰,۲۱)	(۲۲,۵۰ و ۲۴,۱۹)
۱۰۰	(۲۴,۷۵ و ۲۵,۰۶)	(۲۴,۰۶ و ۲۵)	(۲۴,۶۸ و ۲۶,۰۴)	(۲۴,۳۱ و ۲۵,۰۴)	(۲۲,۸۷ و ۳۰,۲۲)
۱۰۰۰	(۲۵,۴۵ و ۳۱,۶۹)	(۲۴,۳۱ و ۳۲,۸۱)	(۲۵,۲۴ و ۳۲,۸۱)	(۲۴,۹۱ و ۳۱,۵۰)	(۲۱,۳۷ و ۳۷,۶۲)

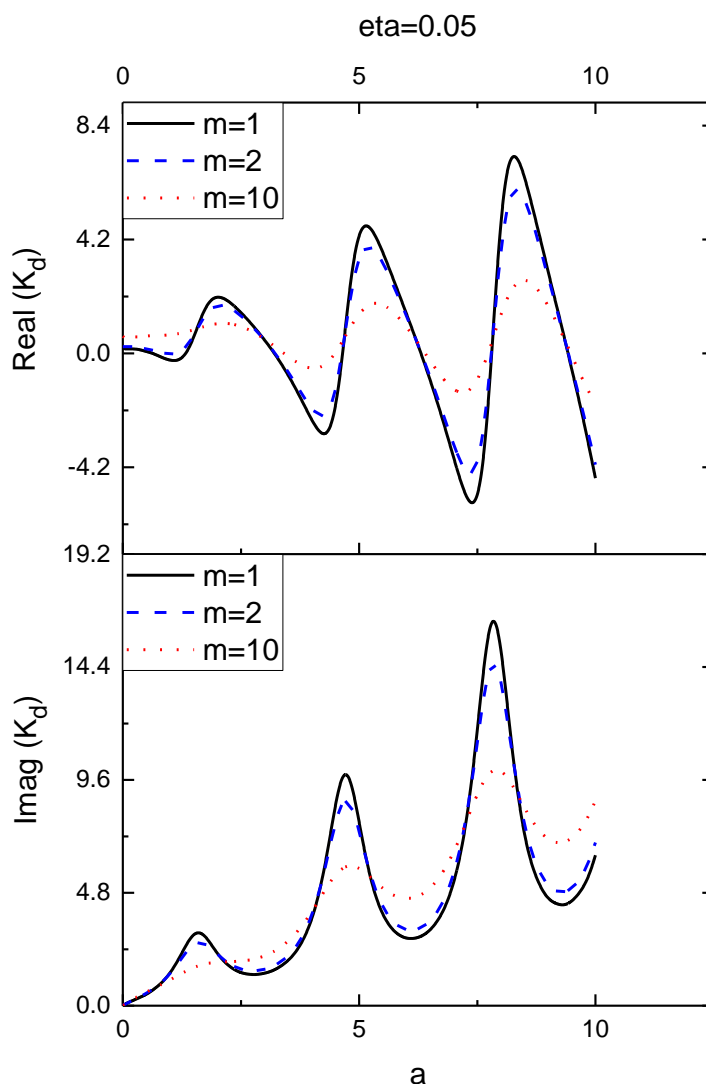
از این قسمت به بعد تاثیر پارامترهای خاک و شمع بر پاسخ دینامیکی شمع تک در حالت شناور، با فرض متغیرهای $\bar{h} = 20$ و $\bar{E} = 960$ برای گرفتن مقادیر $K_d = \frac{PH}{u_p(0)E_pA}$ و $a = \frac{\omega H}{C_p}$ برای فرکانس و همچنین برای این قسمت از تحلیل ارتفاع خاک زیر شمع $H=10$ متر در نظر گرفته شده و $\bar{\rho} = 1.14$ به دست آمده است. بیشتر در نظر گرفتن این ارتفاع تاثیری در محاسبات ندارد.

۴-۲- شمع شناور در خاک غیر همگن خطی

در این قسمت، خاک به صورت غیر همگن خطی (مدل گیبسون) مدلسازی می‌شود. به این صورت که مدول برشی خاک (G_s) به صورت $G_s = G_{s0} + mZ$ تعریف می‌شود، یعنی سختی خاک به صورت خطی با عمق افزایش می‌یابد.

۴-۲-۱- تاثیر تغییر ضریب m

در این بخش، تاثیر تغییر ضریب m بر پاسخ دینامیکی شمع بررسی شده است. مقادیر m برای مقایسه ۱، ۲ و ۱۰ مگاپاسکال در متر و مقدار میرایی برای این قسمت، ۰,۰۵ درصد فرض شده است. نتایج تحلیل‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل، با افزایش m مقدار سختی کاهش می‌یابد و با افزایش فرکانس، درصد اختلاف بین نمودارهای سختی، افزایش می‌یابد. برای دو مقدار در نظر گرفته شده برای میرایی، نمودارهای سختی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند و نتایج به هم نزدیک هستند.



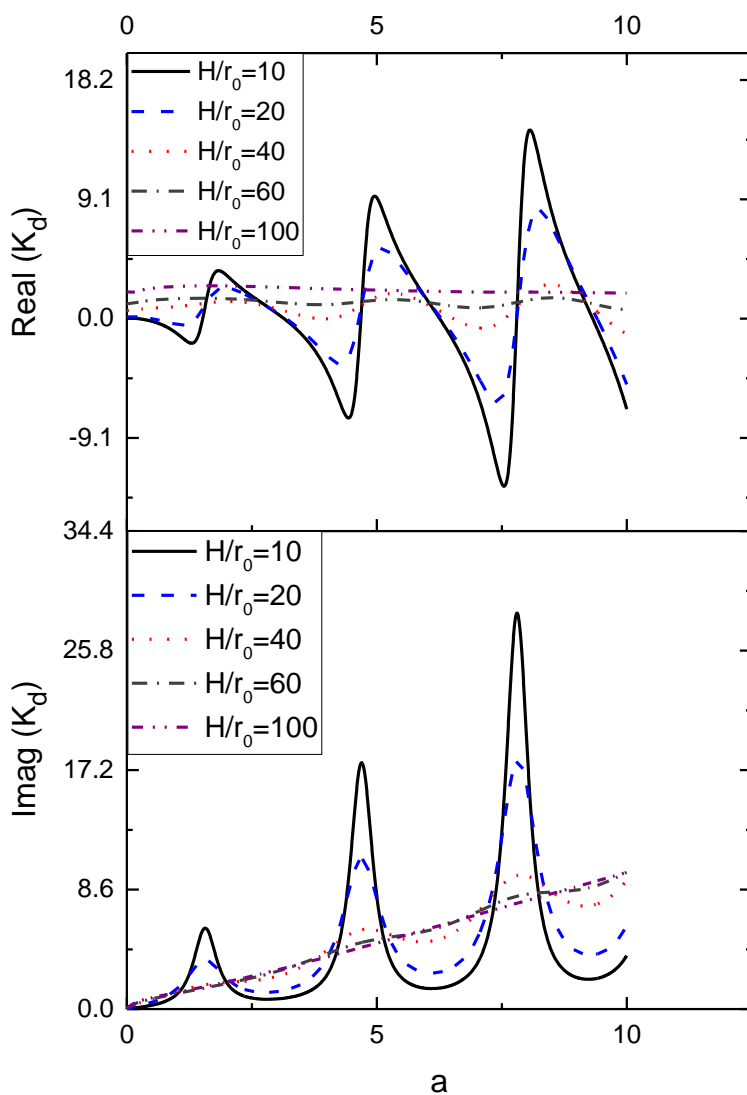
شکل ۴- مقایسه سختی دینامیکی شمع برای مدل گیبسون با دمپینگ ۰,۰۵ برای $m=1, 2, 10 \text{ MPa/m}$

۴-۳- شمع شناور در خاک غیر همگن غیر خطی

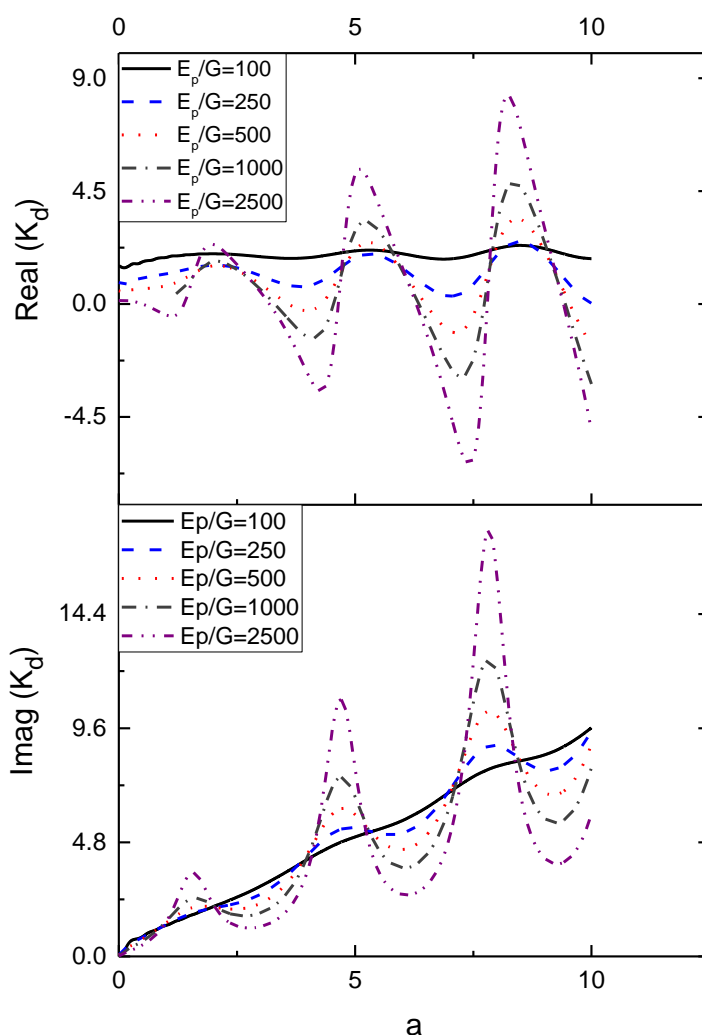
در این قسمت خاک به صورت غیر همگن غیر خطی مدلسازی می‌شود. بدین منظور تغییرات مدول برشی خاک با معادله $G_s = G_{s0} + mZ^n$ بیان شده است.

۴-۳-۱- تاثیر تغییر نسبت لاغری (H/r_0) بر سختی دینامیکی (K_d)

شکل ۵ تاثیر نسبت لاغری شمع و شکل ۶ تاثیر نسبت مدول، بر سختی مرکب را برای شمع شناور در خاک همگن نشان می‌دهند. همانطور که در شکل‌ها مشخص است در کل بازه فرکانس، منحنی سختی با افزایش فرکانس حول یک خط نوسان می‌کند. دامنه نوسان سختی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. مقدار سختی با افزایش نسبت لاغری شمع کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت مدول افزایش می‌یابد.



شکل ۵- تاثیر نسبت لاغری بر پاسخ دینامیکی شمع برای مدل غیرهمگن غیرخطی با میرایی ۰٫۱ و با فرض $n=0.5$



شکل ۶ تاثیر نسبت مدول بر پاسخ دینامیکی شمع برای مدل غیرهمگن غیرخطی با میرایی ۰٫۱ و با فرض $n=0.5$

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، پاسخ دینامیکی تک شمع در حالت شناور در خاک الاستیک، در اثر ارتعاش قائم، بررسی شده است. برای صحت سنجی، حل مقاله با حل آی و لیو [۷] مقایسه شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱. نتایج مطابقت خوبی با حل آی و لیو [۷] دارد و این امر، صحت این نتیجه گیری را نشان می‌دهد.
۲. در خاک غیرهمگن سختی در m های مختلف متفاوت است و با افزایش m مقدار سختی کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش فرکانس، دامنه نوسان سختی افزایش می‌یابد.
۳. نسبت لاغری و نسبت مدول شمع نیز بر پاسخ دینامیکی شمع تاثیرگذارند، در کل بازه فرکانس، سختی با افزایش فرکانس حول یک خط نوسان می‌کند. دامنه نوسان سختی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. مقدار سختی با افزایش نسبت لاغری شمع کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت مدول افزایش می‌یابد.



مراجع

- [1] Wang, K., Wu, W., Zhang, Z., and Leo, C. J. (2010) Vertical dynamic response of an inhomogeneous viscoelastic pile, *Computers and Geotechnics* 37, 536-544.
- [2] Zhou, X.-L., Wang, J.-H., Jiang, L.-F., and Xu, B. (2009) Transient dynamic response of pile to vertical load in saturated soil, *Mechanics Research Communications* 36, 618-624.
- [3] Nogami, T., and Konagai, K. (1986) Time domain axial response of dynamically loaded single piles, *Journal of Engineering Mechanics* 112, 1241-1252.
- [4] Nogami, T., and Konagai, K. (1987) Dynamic response of vertically loaded nonlinear pile foundations, *Journal of geotechnical engineering* 113, 147-160.
- [5] Wu, W., Wang, K., Zhang, Z., and Leo, C. J. (2013) Soil-pile interaction in the pile vertical vibration considering true three-dimensional wave effect of soil, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 37, 2860-2876.
- [6] Zheng, C., Ding, X., Li, P., and Fu, Q. (2015) Vertical impedance of an end-bearing pile in viscoelastic soil, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 39, 676-684.
- [7] Ai, Z. Y., and Liu, C. L. (2015) Vertical vibration of a pile in transversely isotropic multilayered soils, *Journal of Sound and Vibration* 357, 145-155.
- [8] Zeng, X., and Rajapakse, R. (1999) Dynamic axial load transfer from elastic bar to poroelastic medium, *Journal of Engineering Mechanics* 125, 1048-1055.
- [9] Rajapakse, R., and Shah, A. (1987) On the longitudinal harmonic motion of an elastic bar embedded in an elastic half-space, *International Journal of solids and structures* 23, 267-285.
- [10] Rajapakse, R. (1988) A note on the elastodynamic load transfer problem, *International journal of solids and structures* 24, 963-972.