



مرکز بررسی‌ها و مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



پدرام روان شناس
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

p_ravanshenas@sina.kntu.ac.ir

محمود قضاوی
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ghazavi_ma@kntu.ac.ir

چکیده

در سازه‌های ساحلی، پی‌های شمع معمولاً توأمان تحت بارهای قائم و جانبی قرار دارند. شمع‌ها عموماً برای تحمل بار بیشتر و مدفون شدن در لایه‌های سست، به صورت گروهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طراحی‌های معمول اثر حضور بار قائم بر اندرکنش جانبی در نظر گرفته نخواهد شد. در روش‌های موجود، بطور مستقل شمع‌ها در ابتدا برای ظرفیت باربری و نشست بار قائم طراحی شده و سپس به محاسبه و تعیین ظرفیت باربری و تغییر مکان جانبی آنها پرداخته می‌شود. این روش برای سازه‌های فراساحلی که تحت تأثیر بارگذاری جانبی قابل ملاحظه‌ای قرار دارند چندان معتبر نخواهد بود. در این پژوهش به محاسبه اندرکنش جانبی شمع - خاک - شمع تحت بارگذاری هارمونیک جانبی با حضور بار قائم استاتیکی که به سبب اثر سازه‌های فوقانی بر شمع‌ها وارد می‌شود، پرداخته شده است. بدین منظور، بصورت تحلیلی و به کمک روش الاستو - دینامیکی که Novak ارائه کرده به اندرکنش دینامیکی بین دو شمع پرداخته شده است. روش حاصل شده بر اساس امواج دایره‌ای می‌باشد که در امتداد هر شمع و بصورت شعاعی در محیط خاک انتشار یافته و سبب تغییر در رفتار شمع‌هایی خواهد شد که به فاصله و جهات مختلف از شمع اول قرار دارند. حضور شمع دوم در تغییر مکان آن ناشی از شمع اول، بصورت تغییر در ضریب اندرکنش بیان شده و به تبع آن باعث تغییر در ضریب سختی و میرایی گروه شمع خواهد شد. مقادیر بدست آمده نتایج قابل قبولی را در مقایسه با روش‌های معتبر ارائه داده‌اند و نشان می‌دهند که حضور بار قائم باعث افزایش تغییر مکان جانبی شمع و در ادامه افزایش ضریب اندرکنش بین دو شمع خواهد شد. کلمات کلیدی: نوسانات هارمونیک، بارگذاری جانبی، بارگذاری قائم، اندرکنش شمع - خاک - شمع، سختی، میرایی.

مقدمه

به تازگی به سبب زمین لرزه‌های مخرب، پاسخ شمع‌ها تحت بار جانبی تحت بررسی‌های فراوان قرار گرفته است. بارهای جانبی متداولی همچون زلزله، بادهای قوی و اثرات ضربه‌ای یخ‌های شناور از مهمترین آنها خواهد بود. بسیاری از مطالعات انجام شده برای فهم بهتر رفتار شمع‌ها تحت بار قائم (استاتیکی یا دینامیکی) صورت گرفته است اما بسیاری از مفاهیم بارگذاری جانبی نامعلوم باقی مانده‌اند. برای مقابله با بارهای جانبی دینامیکی ناشی از بار باد، فعالیت‌های لرزه‌ای و اثرات امواج وارد بر سازه‌های فراساحلی می‌توان از شمع‌هایی متناسب با خاک محل بهره فراوان برد. همچنین در سالهای اخیر تحقیقات فراوانی بر روی رفتار دینامیکی گروه شمع‌های مورد استفاده در صنایع نیروگاهی به سبب نیازهای فراوان صورت گرفته است.

در بارگذاری استاتیکی اگر شمع در محدوده تغییر مکان شمع مجاور خود قرار گیرد، این امر سبب افزایش تغییر مکان شمع مورد نظر شده که به این پدیده اندرکنش بین دو شمع اطلاق می‌شود. در نتیجه تغییر مکان کلی گروه شمع u^G بیشتر از جمع تغییر مکان u^S شمع‌هایی خواهد بود که به تنهایی بار متوسط را در گروه متحمل می‌شوند. بازده گروه شمع u^S/u^G همیشه کمتر از عدد یک بوده و با کاهش فواصل بین شمع‌ها و افزایش تعداد شمع‌ها در گروه کاهش پیدا خواهد کرد.

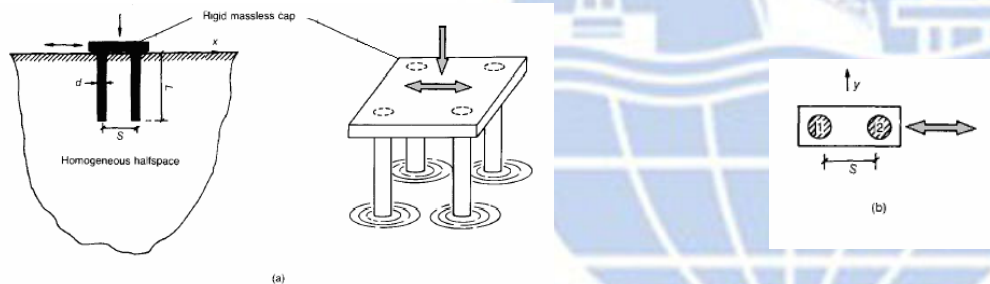
تحلیل‌های فراوانی بر روی رفتار جانبی گروه شمع‌ها صورت گرفته که در ابتدا توسط Poulos (1968,1971) به کمک مفهوم ضریب اندرکنش و تعمیم آن با استفاده از جمع آثار قوا از دو شمع تا به بالا، به بررسی اثرات گروهی پرداخته شده است. ضریب اندرکنش برای هر درجه از آزادی سر شمع‌ها به کمک روابطی توسط Poulos & Mattes (1971)، Batterfield & Banerjee (1971)، Poulos & Davis (1980) و تحقیقات وسیع عددی توسط Naylor & Hooper (1975)، Ottaviani (1975) و روشهای متعددی توسط Nogami (1980,1983)، Kaynia & Kausel (1982)، Novak (1984)، Wass & Hartman (1981,1984)، Roesset (1984) و Davis & Banerjee (1985) دیگران نیز حاصل شده است.

در این مقاله یک روش ساده تحلیلی جهت اصلاح ضریب اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع در خاک یکنواخت ارائه شده است. مطالعات پارامتری بر روی دو شمع شناور با $s/d=2,5,10$ و $\theta=0$ صورت گرفته است. مهمترین هدف این مقاله ارائه مطالعات بر روی عامل موثر در رفتار گروه شمع یعنی ضریب اندرکنش در شمع‌های تحت بارگذاری جانبی دینامیکی با حضور بار قائم خواهد بود. در ادامه می‌توان با تعیین این ضریب و قانون جمع آثار قوا توسط Poulos به تعیین رفتار گروه شمع‌ها پرداخت.

روش بسیار متداول برای تحلیل و طراحی شمع‌ها، روش تیر بر روی بستر الاستیک خواهد بود. مهمترین مزیت این روش سادگی، تطبیق پذیری و دقیق بودن آن در صورت استفاده از مقادیر مناسب ضریب عکس‌العمل می‌باشد. در میان بسیاری از فرض‌های سخت و غیر معمول برای تحلیل شمع‌ها، اساسی‌ترین کار بر طبق روش Poulos و Banerjee می‌باشد که آن هم بر پایه تئوری Mindlin بر اساس بارهای نقطه در یک محیط الاستیک نامحدود استوار است. نتایج مطالعات وسیع توسط Poulos یک روش معمول و عامل کلیدی در تعیین رفتار گروهی شمع‌ها بوده که در ادامه با تغییراتی می‌توان سختی گروه شمع را به فاصله بین شمع‌ها، سختی و صلیبیت خمشی شمع، طول شمع و تعداد شمع‌ها در گروه وابسته دانست.

سختی دینامیکی گروه شمع‌های قائم در هر فرکانسی از بارگذاری را نمی‌توان به سادگی با جمع ساده سختی تمام شمع‌ها موجود در یک گروه بدست آورد. این هم به مانند رفتار استاتیکی، وابسته به اثر شمع‌های مجاور می‌باشد که سبب تغییر در رفتار و تغییر مکان لرزه‌ای گروه شمع شده و عامل افزایش تغییر مکان هر شمع در گروه در مقایسه با رفتار تکی آن خواهد شد. ضریب اندرکنش دینامیکی شمع - خاک - شمع نیز به فرکانس وابسته بوده و این هم بخاطر خروج امواج بارگذاری از یک شمع و سپس انتشار آن در محیط و برخورد و اثرپذیری آن به شمع‌های مجاور پس از تغییرات به سبب میرایی خواهد بود. تحقیقات عددی و تحلیلی فراوانی مبنی بر محاسبه پاسخ‌های لرزه‌ای گروهی شمع‌ها برای تعیین ضریب اندرکنش مناسب صورت گرفته است.

در مقاله حاضر، شمع‌ها بصورت یک مقطع استوانه‌ای شکل با رفتار الاستیک خطی و محیط خاک نیز بصورت یکنواخت در فضای نیمه محدود ویسکوالاستیک با میرایی هیستریزس خطی رفتار خواهند کرد. همچنین فرض عدم جدایش بین شمع و خاک اطراف آن نیز برقرار می‌باشد. از تحلیل‌ها نیز می‌توان برای شمع‌های جدار نازک، شمع‌های فولادی مرکب پر شده با بتن و شمع‌های H شکل، با انتخاب مناسب و موثر E_p (Randolph (1981) و Gazetas & Dobry (1984) استفاده کرد. شکل ۱ مقطع شمع‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۱: پلان و مقطع شمع‌های مورد مطالعه در این پژوهش

برای رفتار دینامیکی، بارگذاری با فرکانس ω و مقادیر مختلط سختی K_U^G برای گروه شمع بصورت نسبت بار (مجموع بار جانبی H^G) به حرکت صلب کلاهک سر شمع (تغییر مکان جانبی u^G) تعریف شده‌اند. به عنوان مثال برای بار جانبی بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$K_U^G = k^G + i.(c^G . \omega) = H^G / u^G \quad (1)$$

مقادیر $a_0 = \omega . r_0 / V_s$ فرکانس بدون بعد و $i = \sqrt{-1}$ پارامترهای k^G و c^G به ترتیب ضرایب فنریت و میرایی سر کلاهک گروه شمع بوده که هر دو وابسته به فرکانس دورانی $\omega = 2\pi f$ می‌باشند. در این مقاله k^S و c^S مقادیر وابسته به ضرایب فنریت و میرایی هر شمع در همان فرکانس خواهند بود.

فرض‌های اساسی در این روش

روش اصل جمع آثار قوا در ابتدا توسط Poulos (1968, 1971) برای تحلیل گروه شمع در بارگذاری استاتیکی ارائه شد و سپس روش فوق با بهره‌گیری از وابسته بودن بارگذاری دینامیکی به فرکانس، برای رفتار دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت. (Kaynia & Kausel (1982) ، Sanches-Saliner (1983) و Rosset (1984) نشان دادند که نتایج این روش در مقایسه با روش‌های سخت دینامیکی نتایج قابل قبولی را ارائه می‌کنند. در نتیجه پاسخ گروه شمع می‌تواند با کمک روش جمع آثار قوا و تعیین ضریب اندرکنش بدست آمده از دو شمع حاصل شود. در تعیین ضریب اندرکنش بین دو شمع اثر حضور شمع‌های بین دو شمع مورد مطالعه، در نظر گرفته نخواهد شد. این بدین معنا است که موقع محاسبه اثر شمع p بر روی شمع q شمع‌های مابین این دو در ضریب اندرکنش آنها مدنظر نخواهند بود. همچنین موقعی که تعداد شمع‌ها در گروه زیادتیر و فاصله بین آنها کمتر شود این ضریب افزایش پیدا خواهد کرد.

Winkler (1867) مدل خود را برای بررسی رفتار اندرکنش بین خاک و سازه ارائه کرد. این مدل بصورت یک بعدی و با تقسیم مرزهای شمع و خاک به قطعات افقی صورت گرفته است. همچنین این مدل مناسبی برای محاسبه اندرکنش دینامیکی بین شمع و خاک خواهد بود. در این روش عکس العمل خاک با شمع توسط فنرها و میراگرهای مستقل که در طول شمع توزیع شده اند مدل می شود. مدل وینکلر نتایج قابل قبولی را به دلایل زیر ارائه می دهد:

(۱) پیش بینی های بدست آمده نتایج قابل قبولی را با Novak (1974)، Dobry (1982) و Gazetas & Dobry (1984) ارائه نموده اند.

(۲) براحتی می تواند برای انواع خاک با خصوصیات گوناگون در اعماق مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

(۳) دارای محاسبات کمتری در مقیاسه با روش های مختلف مانند اجزا محدود و ... خواهد بود.

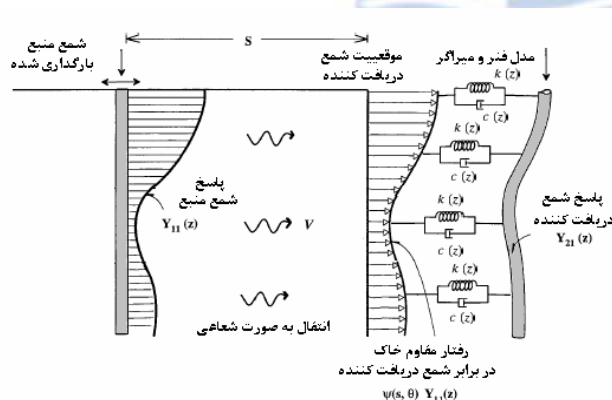
فرض اساسی در این مدل بدین صورت است که تغییر مکان (y) در هر نقطه از محیط خاک، در مرز بین شمع و خاک، بطور مستقیم وابسته به تنش (p) آن نقطه بوده و مستقل از نقاط دیگر دانست.

روابط بار - تغییر مکان را می توان بصورت مستقیم به روابط تنش - کرنش بصورت $p=k.y$ (سختی = k) تبدیل نمود. سختی مورد استفاده را می توان بصورت تئوری (روش Mindlin) و یا بکمک منحنی p-y بدست آورد.

برای استفاده از روش وینکلر در رفتار غیر خطی دینامیکی می توان از مدل اصلاح شده وینکلر استفاده کرد که علاوه بر اثر سختی المان شمع و خاک از جرم و میرایی آن ($p=c.y'$) نیز استفاده کرد.

نگاه اجمالی به روش ارائه شده

در این روش سه گام اساسی در نظر گرفته شده است که بصورت کلی در شکل ۲ برای بارگذاری هارمونیک جانبی شمع با حضور بار قائم نشان داده شده است.



شکل ۲: مدل ارائه شده برای محاسبه اثر حضور بار قائم بر روی اندرکنش هارمونیک جانبی

متغیر مختلفی شامل سختی و میرایی، برای رفتار دینامیکی شمع در نظر گرفته شده است. شمع مورد نظر بصورت تیری انعطاف پذیر بطول نامحدود (بیش از طول موثر ارائه شده در جداول ۱ و ۲ (Gazetas & Dobry (1984)) بصورت الاستیک خطی با سطح مقطع معادل دایره ای شکل A_p ، قطر d ، ممان دوم سطح I_p ، چگالی ρ_p ، طول L و جرم در واحد طول $A_p \cdot \rho_p = m_p$ ضریب میرایی β_p و مدول یانگ E_p و خاکی با خصوصیات مدول یانگ E_s ، سرعت موج برشی V_s و ضریب میرایی β_s در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: طول موثر تحت بار دینامیکی برای تخمین موثر

Soil Profile	Active Length/Width, l_a/b	
	Expression	Typical range
مدول یانگ شمع E_s (مدول یانگ خاک E_p)	$3.3(E_p/E_s)$	8-20
مدول یانگ شمع E_p		
مدول یانگ خاک E_s		
ضریب شکل شمع در جدول $S=2$		

جدول ۲: ضریب شکل شمع

Pile cross section	Shape Factor, S
Circular (diameter: b)	1
Pipe (diameters: outside b , inside b_i)	$1-(b_i/b)^4$
Rectangular (lateral width: $2B$, length: $2A$)	$1.7(A/B)^3$

سختی مختلط وابسته به فرکانس، از دو بخش K_1 برای سختی فنریت و K_2 برای ضریب میرایی تشکیل یافته است. میرایی موجود سبب کاهش انرژی انتشار یافته به صورت میرایی شعاعی (c_r) و میرایی هیستریزس (c_{mp}, c_{ms}) تعریف خواهد شد.

$$c \approx c_m + c_r \quad (2-الف)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_m}{c_r} &= \beta \\ c_r &= \frac{2.K}{\omega} \end{aligned} \right\} \Rightarrow c_m = 2.\beta.\frac{K}{\omega} \quad (2-ب)$$

در رابطه (2)، c_m وابسته به اتلاف انرژی داخلی در خاک و ضریب میرایی β بوده، همچنین c_r نیز وابسته به استهلاک انرژی ناشی از انتشار امواج در محیط خاک می‌باشد. در اصول انتشار امواج مقادیر c_r تابعی از خصوصیات الاستیک خاک بوده اما مستقل از فرکانس می‌باشد (میراگرهای ویسکوز). از طرف دیگر c_r را می‌توان از رابطه (3) بدست آورد (Novak (1974):

$$c_r.\omega = G.S_{U2} = k_2 \quad (3)$$

سختی مختلط افقی در واحد طول یک المان استوانه‌ای بصورت رابطه (4) تعریف می‌شود (Novak (1974):

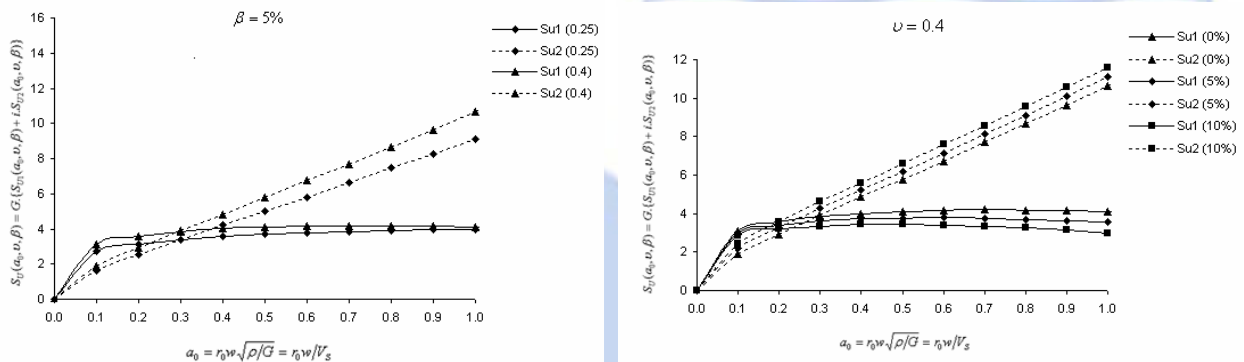
$$k_u = k_1 + i.k_2 = G.[S_{U1}(a_0, \nu, \beta) + i.S_{U2}(a_0, \nu, \beta)] \quad (4)$$

$$k_u = \pi.G.a_0^2.T \quad (5-الف)$$

$$T = -\frac{4K_1(b_0^*)K_1(a_0^*) + a_0^*K_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + b_0^*K_0(b_0^*)K_1(a_0^*)}{b_0^*K_0(b_0^*)K_1(a_0^*) + a_0^*K_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + b_0^*a_0^*K_0(b_0^*)K_0(a_0^*)} \quad (5-ب)$$

$$b_0^* = \frac{a_0 i}{\eta\sqrt{1+i2\beta}} \quad ; \quad \eta = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad ; \quad a_0^* = \frac{a_0 i}{\sqrt{1+i2\beta}} \quad (5-ج)$$

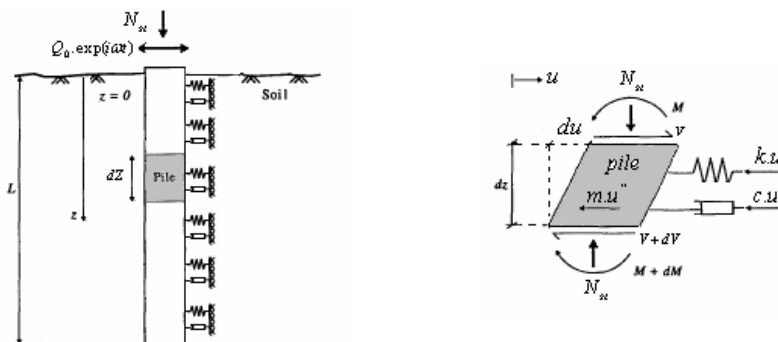
مقادیر K_1 و K_0 پارامترهای مرتبه صفر و یک توابع نوع دوم بسط اصلاح شده می‌باشند. مقادیر S_{U2} و S_{U1} در شکل 3 نشان داده شده‌اند.



شکل 3: پارامترهای سختی و میرایی افقی S_U . Novak (1974)

الف) تغییر مکان شمع تکی (شمع مرجع)

معادله تعادل تغییر مکان جانبی شمع پس از تعیین نیروهای وارد بر المانی از شمع و خاک در عمق دلخواه (شکل 4) به یک معادله دیفرانسیل مرتبه چهار تبدیل خواهد شد:



شکل 4: المانی از شمع مرجع تحت بارگذاری جانبی

$$\Rightarrow E_P I_P \frac{d^4 U}{dz^4} + N_{ST} \frac{d^2 U}{dz^2} + (mU'' + CU') + KU = 0 \quad (6)$$

با تعریف بار بحرانی اویلر (N_E) و ضریب بار (S) با توجه به شرایط مرزی:

$$S = N_{ST}/N_E \quad \text{و} \quad N_E = \frac{\pi^2 \cdot E_P \cdot I_P}{L^2} \quad (7)$$

معادله دیفرانسیل بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{d^4 U}{dz^4} + \left(\frac{\pi^2}{L^2}\right) \left(\frac{N_{ST}}{N_E}\right) \frac{d^2 U}{dz^2} + \left(\frac{(K - m\omega^2 + iC\omega)}{E_P \cdot I_P}\right) U = 0 \quad (8)$$

و با توجه به شرایط مرزی:

$$z = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \theta_{11} = 0 \\ V_{11} = E_P \cdot I_P \cdot \frac{d^4 U_{11}}{dz^4} = Q_0 \end{array} \right\} \quad z \approx \infty \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} U_{11} = 0 \\ \theta_{11} = \frac{dU_{11}}{dz} = 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

جواب معادله تعادل در طول حرکت هارمونیک بصورت $u_{11} = U_{11}(z) \cdot \exp(i\omega t)$ بدست آمده که از رابطه (۱۰) حاصل می‌شود:

$$U_{11}(z) = B_{11} \cdot \exp[-(a + bi) \cdot z] + C_{11} \cdot \exp[(c + di) \cdot z] \quad (10)$$

ضرائب B_{11} و C_{11} از رابطه:

$$B_{11} = \frac{Q_0}{E_P \cdot I_P \cdot [(a + bi) \cdot (c + di)^2 - (a + bi)^3]} \quad C_{11} = \frac{Q_0}{E_P \cdot I_P \cdot [(c + di)^3 - (c + di) \cdot (a + bi)^2]} \quad (11)$$

و مقادیر a, b, c و d

$$\begin{aligned} a &= \frac{\pi}{L \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{r_1} \cdot \left(\cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \right) & b &= \frac{\pi}{L \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{r_1} \cdot \left(\sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \right) \\ c &= \frac{\pi}{L \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{r_2} \cdot \left(\cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \right) & d &= \frac{\pi}{L \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{r_2} \cdot \left(\sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

و پارامترهای r و θ

$$r = \sqrt{\left(\frac{N_{ST}^2 - 4 \cdot E_P \cdot I_P \cdot (k_1 - m\omega^2)}{N_E^2}\right)^2 + \left(\frac{4 \cdot E_P \cdot I_P \cdot (k_2 + c\omega)}{N_E^2}\right)^2} \quad (13\text{-الف})$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{4 \cdot E_P \cdot I_P \cdot (k_2 + c\omega)}{N_{ST}^2 - 4 \cdot E_P \cdot I_P \cdot (k_1 - m\omega^2)}\right) \quad (13\text{-ب})$$

و مقادیر r_1 و r_2

$$r_1 = \sqrt{\left(\frac{N_{ST}}{N_E} + \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2 + \left(\sqrt{r} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2} \quad r_2 = \sqrt{\left(-\frac{N_{ST}}{N_E} + \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2 + \left(\sqrt{r} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2} \quad (14)$$

θ_1 و θ_2 بصورت:

$$\theta_2 = \begin{cases} \pi + \tan^{-1}\left(\frac{\left(\sqrt{r} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}{\left(-\frac{N_{ST}}{N_E} + \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}\right) & \text{if } \left(-\frac{N_{ST}}{N_E} + \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) < 0 \\ \text{or} \\ 2\pi - \tan^{-1}\left(\frac{\left(\sqrt{r} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}{\left(-\frac{N_{ST}}{N_E} + \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}\right) & \text{if } \left(-\frac{N_{ST}}{N_E} + \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) > 0 \end{cases} \quad \theta_1 = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{\left(\sqrt{r} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}{\left(\frac{N_{ST}}{N_E} + \sqrt{r} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}\right) \quad (15)$$

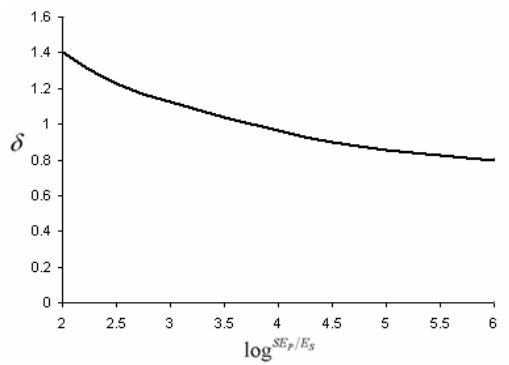
و پارامترهای شمع و خاک نیز با رابطه:

$$\text{Soil} \Rightarrow \begin{cases} k_1 = S_{U1} \\ k_2 = S_{U2} \\ c\omega = 2.\beta_s.K_s; \text{ with: } S_{U2}(a_0, v, \beta = 0) \\ K_s = \delta.E_s \\ \delta(\text{Fixed - Head Piles}) = 1.9827 \times (\log^{SE_p/E_s})^{-0.5174} \end{cases}$$

$$\text{Pile} \Rightarrow \begin{cases} c\omega = 2.\beta_p.K_p \\ K_p(\text{Fixed - Head Piles}) = \frac{12.E_p.I_p}{L^3} \end{cases} \quad (16)$$

تعریف می‌شوند.

مقادیر δ در شکل ۵ نشان داده شده است.

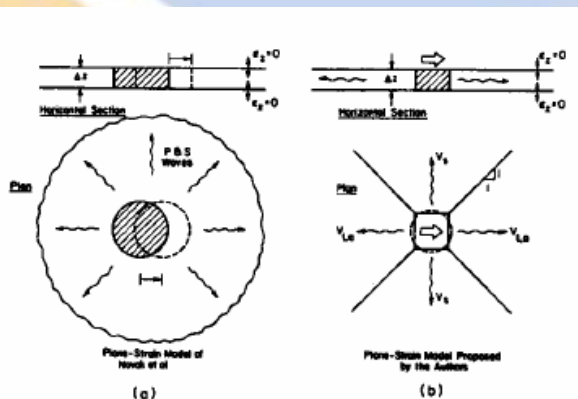


شکل ۵: مقادیر δ ارائه شده در رابطه ۱۶

بعد از تعیین تغییر مکان شمع مرجع، نوبت به تعیین تغییر مکان خاک u_s به فاصله $r=S$ از شمع اول خواهد رسید.

(ب) کاهش تغییر مکان خاک در فاصله دورتر از شمع مرجع

امواج P و S از شمع اول در تمام جهات انتشار یافته و از سطح خاک به درون آن انعکاس پیدا خواهند کرد. مدل‌های تقریبی فراوانی بصورت یک، دو و سه بعدی بصورت ایده‌آل انتشار امواج به درون خاک را نشان می‌دهند. Rosset و همکاران در ابتدا مدل دو بعدی را ارائه نمودند، سپس Novak (1978) مدل پیشرفته دو بعدی را با در نظر گرفتن یک لایه از خاک نامحدود با فرض کرنش مسطح و تغییر مکان قائم صفر، ارائه داد (شکل ۶(a)). روش تقریبی دو بعدی پیشنهادی دیگری بصورت کرنش مسطح توسط Gazetas & Dobry (1984) ارائه شده است (شکل ۶(b)).



شکل ۶: مدل‌های دو بعدی ارائه شده (a) مدل کرنش مسطح (Novak 1978) (b) مدل کرنش مسطح (Gazetas & Dobry 1984)

در این روش فرض شده که امواج کششی و فشاری در دو جهت از چهار جهت در جهات بارگذاری انتشار یافته، در حالی که امواج برشی در دو جهت از چهار جهت در جهات عمود بر نوسان انتشار می‌یابند. شمع q اگر در جهت عمود بر راستای بارگذاری شمع اول p قرار گیرد تحت تاثیر موجی با سرعت V_s و اگر در راستای بارگذاری شمع اول قرار گیرد، تحت تاثیر موجی مشابه موج Lysmer با سرعت V_{La} خواهد بود ($V_s = V_{La} = (3.4/\pi)^*(1-\nu)^*V_s$).

$$u_s(r, \theta, z) = U_s \cdot \exp(i\omega t) = \psi(r, \theta).u_{11}(z) = \psi(r, \theta).U_{11}(z) \cdot \exp(i\omega t) \quad (17)$$

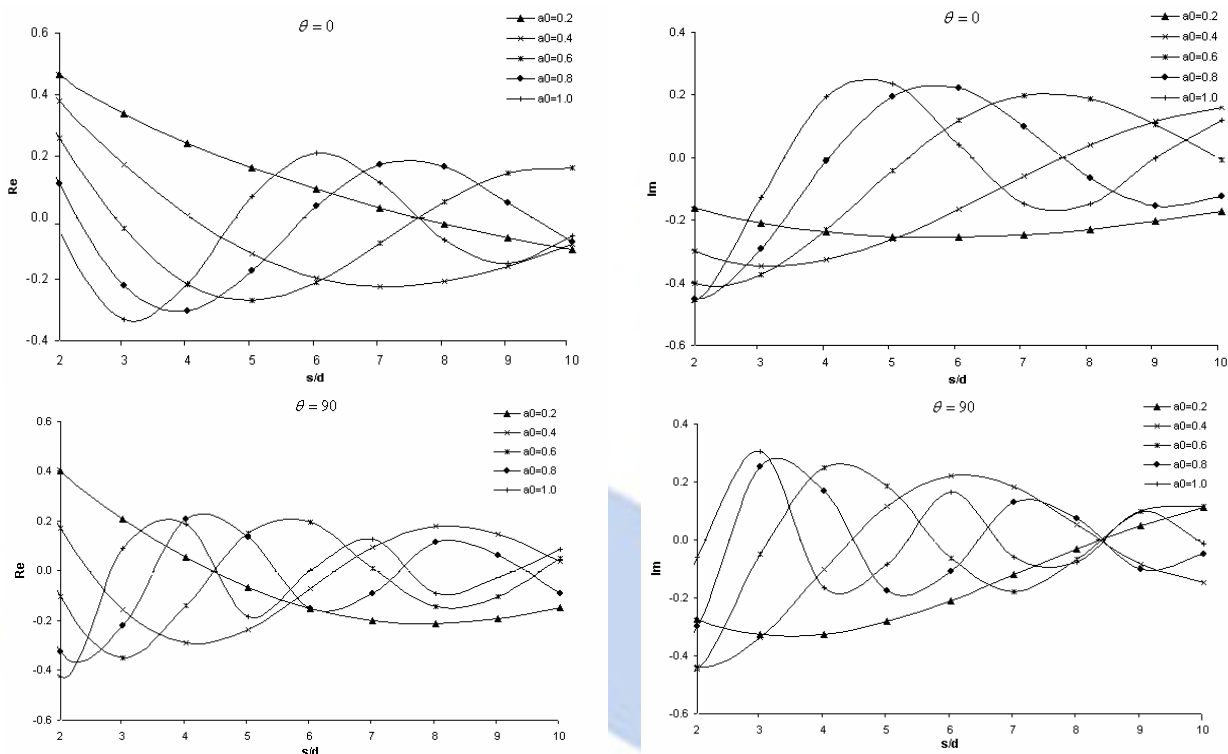
برای شمع‌های تحت نوسانات افقی، ضریب اندرکنش $\Psi(r, \theta)$ وابسته به فاصله بین دو شمع r و θ زاویه بین راستای دو شمع مورد نظر و جهت بارگذاری خواهد بود. لذا جهت تعیین ضریب اندرکنش در هر راستای دلخواه، می‌بایست این ضریب در دو راستای عمود بر هم 0° و 90° درجه محاسبه گردد. شکل ۷ تقریبی را که توسط Gazetas & Dobry (1984) ارائه داده شده، نشان می‌دهد.

$$\Psi(r, \theta) \approx \Psi(r, 0) \cos^2 \theta + \Psi(r, \frac{\pi}{2}) \sin^2 \theta \quad (18-f)$$

$$\Psi(r, 0) = (2 \cdot \frac{s}{d})^{-0.5} \exp(\frac{-2 \cdot \beta \cdot a_0}{\rho} \cdot (\frac{s}{d} - 0.5)) \cdot \exp(\frac{-i \cdot 2 \cdot a_0}{\rho} \cdot (\frac{s}{d} - 0.5)) \quad (18-b)$$

$$\Psi(r, \frac{\pi}{2}) = (2 \cdot \frac{s}{d})^{-0.5} \exp(-2 \cdot \beta \cdot a_0 \cdot (\frac{s}{d} - 0.5)) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot a_0 \cdot (\frac{s}{d} - 0.5)) \quad (18-c)$$

$$a_0 = \frac{\omega \cdot r_0}{V_s} ; \rho = \frac{V_{La}}{V_s} = \frac{3.4}{\pi \cdot (1 - \nu)} \quad (18-d)$$

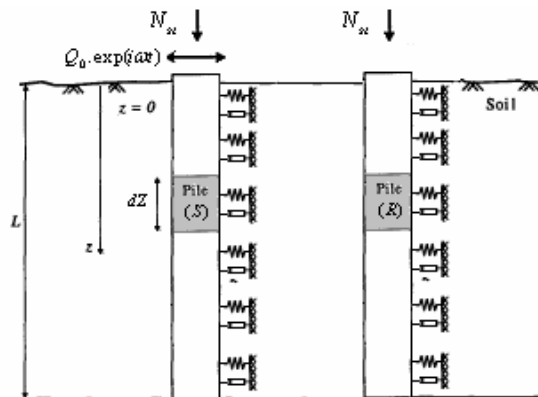


شکل ۷: مقادیر $\Psi(r, 90)$ و $\Psi(r, 0)$ بصورت تابعی از فرکانس و زاویه انحراف

ICOPMAS

ج) اندرکنش بین شمع دریافت‌کننده با امواج رسیده

شمع دوم (شمع دریافت‌کننده) به فاصله $r=s$ از شمع اول (شمع مرجع) قرار دارد (شکل ۸).



شکل ۸: تصویری از المان‌بندی شمع مرجع و دریافت‌کننده تحت بارگذاری جانبی

تغییر مکان خاک در فاصله $r=s$ سبب جابجائی در شمع دوم خواهد بود. در صورتی که در مرحله اول شمع مرجع سبب تغییر مکان خاک شده است. معادله تعادل دینامیکی برای شمع دوم بصورت:

$$\frac{d^4 U_{21}(z)}{dz^4} + \left(\frac{\pi^2}{L^2}\right) \left(\frac{N_{ST}}{N_E}\right) \cdot \frac{d^2 U_{21}(z)}{dz^2} + \left(\frac{K - m\omega^2 + i.C.\omega}{E_p \cdot I_p}\right) U_{21}(z) = \left(\frac{K + i.C.\omega}{E_p \cdot I_p}\right) U_s(z) \quad (19)$$

بعد از جایگذاری U_s از معادله (17) در معادله (19):

$$\frac{d^4 U_{21}(z)}{dz^4} + \left(\frac{\pi^2}{L^2}\right) \left(\frac{N_{ST}}{N_E}\right) \cdot \frac{d^2 U_{21}(z)}{dz^2} + \left(\frac{K - m\omega^2 + i.C.\omega}{E_p \cdot I_p}\right) U_{21}(z) = \left(\frac{K + i.C.\omega}{E_p \cdot I_p}\right) \psi(r, \theta) U_{11}(z) \quad (20)$$

بعد از محاسبات انجام شده جواب معادله بصورت زیر بدست می‌آید:

$$U_{21} = \psi(r, \theta) \cdot (U_p + U_G) \quad (21-الف)$$

$$U_p = z \cdot \{B_{21} \cdot \exp[-(a+bi) \cdot z] + C_{21} \cdot \exp[(c+di) \cdot z]\} \quad \text{(Particular solution)} \quad (21-ب)$$

$$U_G = B'_{21} \cdot \exp[-(a+bi) \cdot z] + C'_{21} \cdot \exp[(c+di) \cdot z] \quad \text{(General solution)} \quad (21-ج)$$

ضرائب B'_{21} و C'_{21} ضرائب جدیدی می‌باشند که از شرایط مرزی شمع دریافت‌کننده (نیروی برشی و زاویه دوران صفر در راس شمع) بدست می‌آیند.

$$B_{21} = - \frac{\left\{ \frac{k_1 + (k_2 + c.\omega).i}{N_E} \right\} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}{4.(a+bi)^3 + 2.\left(\frac{N_{ST}}{N_E}\right).\left(\frac{\pi}{L}\right)^2.(a+bi)} \cdot B_{11} \quad C_{21} = + \frac{\left\{ \frac{k_1 + (k_2 + c.\omega).i}{N_E} \right\} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}{4.(c+di)^3 + 2.\left(\frac{N_{ST}}{N_E}\right).\left(\frac{\pi}{L}\right)^2.(c+di)} \cdot C_{11} \quad (22)$$

بعد از حل معادله (22) ضرائب B'_{21} و C'_{21} تعیین می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} -(a+bi) & (c+di) \\ -(a+bi)^3 & (c+di)^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B'_{21} \\ C'_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -3.(a+bi)^2 & -3.(c+di)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{21} \\ C_{21} \end{bmatrix} \quad (23)$$

با تعیین پاسخ شمع دریافت‌کننده، ضریب اندرکنش دینامیکی با توجه به تعریف:

$$\alpha = \frac{\text{تغییر مکان جانبی اضافی شمع دوم ناشی از بارگذاری شمع اول}}{\text{تغییر مکان جانبی شمع اول تحت بارگذاری همان شمع}} \quad (24)$$

را می‌توان در $z=0$ بشکل زیر بیان کرد:

$$\alpha = \frac{U_{21}}{U_{11}} = \psi(r, \theta) \cdot \frac{(B'_{21} + C'_{21})}{(B_{11} + C_{11})} \quad (25)$$

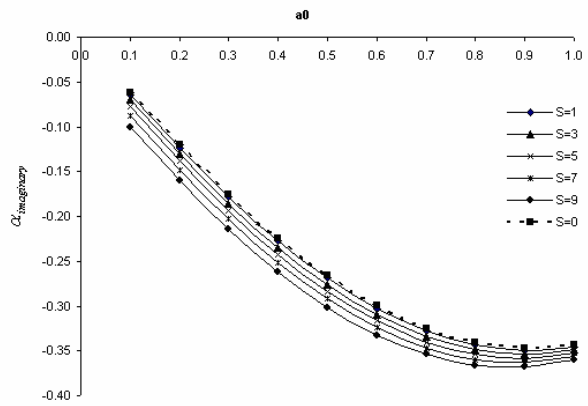
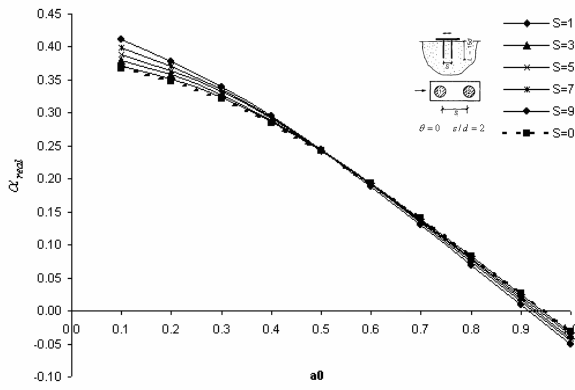
بعلا اینک ضریب اندرکنش (α) یک عدد مختلط بوده، لذا از دو بخش حقیقی و موهومی تشکیل یافته است.

$$\alpha = \alpha_{real} + i\alpha_{imaginary} \quad |\alpha| = \sqrt{\alpha_{real}^2 + \alpha_{imaginary}^2} \quad (26)$$

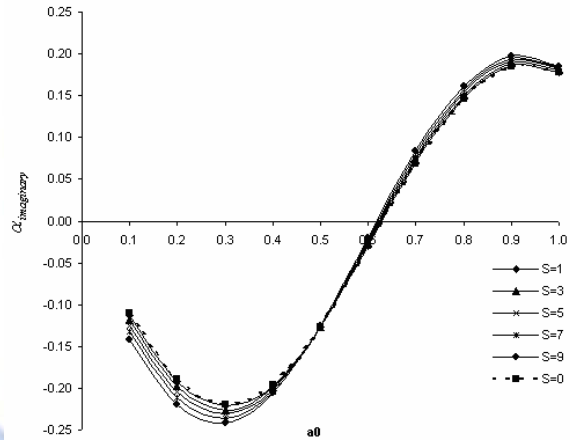
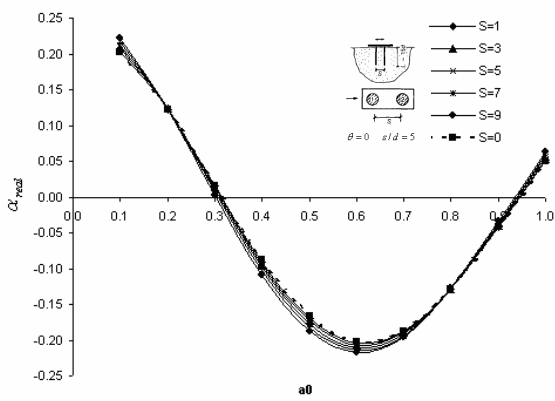
نتایج مطالعات پارامتریک و مقایسه بین آنها

در ابتدا اثر ضریب بار بر ضریب اندرکنش دینامیکی (با حضور بار قائم و شمع دوم) در فواصل $s/d=2, 5, 10$ و $\theta=0$ در دو مقدار حقیقی و موهومی در شکل‌های ۹ تا ۱۱ و بر مقدار مطلق ضریب اندرکنش در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

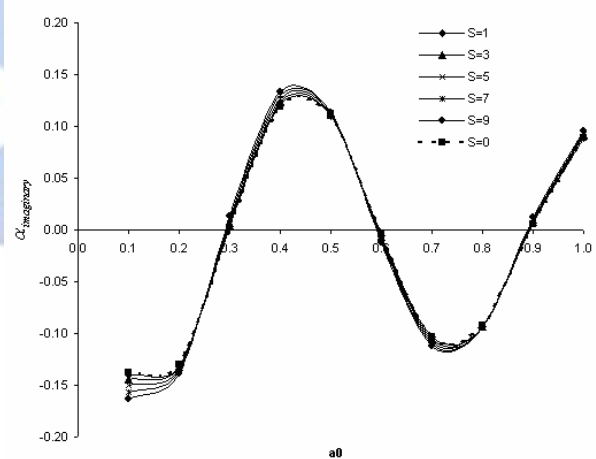
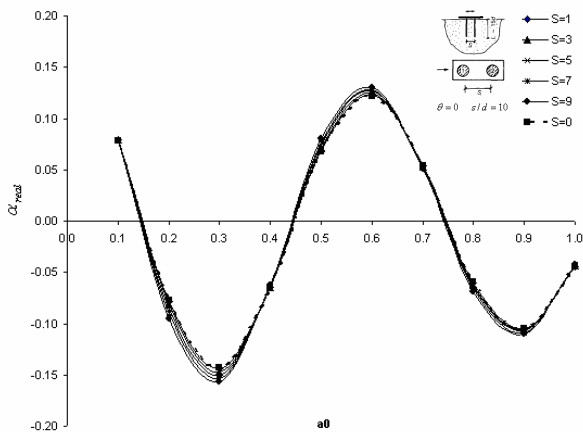
• همانطور که در نمودارها نشان داده شده است با افزایش فاصله بین دو شمع مقادیر ضریب اندرکنش چه حقیقی و چه موهومی کاهش پیدا خواهد کرد.



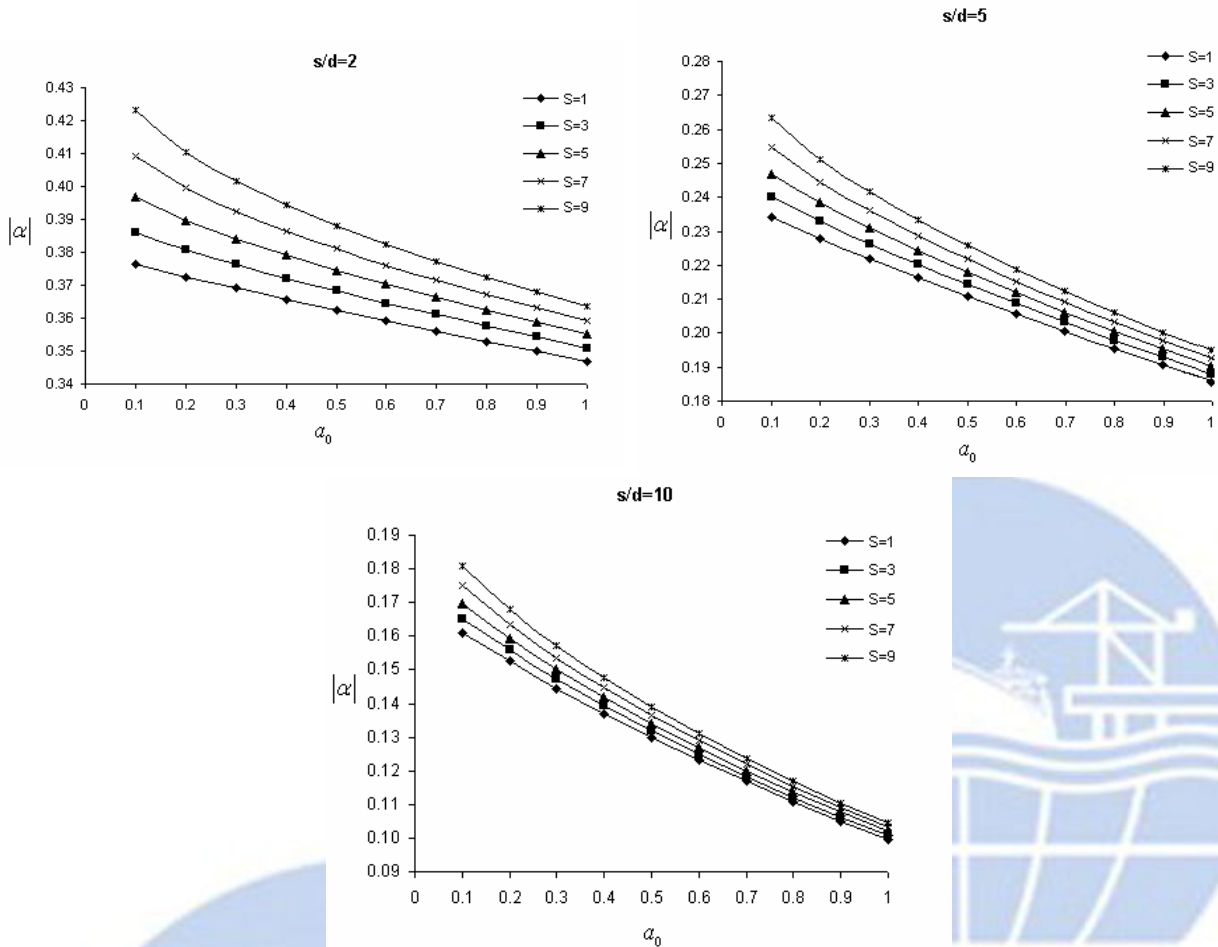
شکل ۹: اثر ضریب بار بر روی ضریب اندرکنش دینامیکی (با حضور بار قائم و شمع دوم)
 $(L/d = 15, E_p/E_s = 1000, \rho_s/\rho_p = 0.7, \theta = 0, s/d = 2, a_0 = \omega r_0 / V_s, S = N_{ST}/N_E)$



شکل ۱۰: اثر ضریب بار بر روی ضریب اندرکنش دینامیکی (با حضور بار قائم و شمع دوم)
 $(L/d = 15, E_p/E_s = 1000, \rho_s/\rho_p = 0.7, \theta = 0, s/d = 5, a_0 = \omega r_0 / V_s, S = N_{ST}/N_E)$



شکل ۱۱: اثر ضریب بار بر روی ضریب اندرکنش دینامیکی (با حضور بار قائم و شمع دوم)
 $(L/d = 15, E_p/E_s = 1000, \rho_s/\rho_p = 0.7, \theta = 0, s/d = 10, a_0 = \omega r_0 / V_s, S = N_{ST}/N_E)$



شکل ۱۲: اثر ضریب بار بر روی مقادیر مطلق ضریب اندرکنش دینامیکی (با حضور بار قائم و شمع دوم)
 ($L/d = 15, E_p/E_s = 1000, \rho_s/\rho_p = 0.7, \theta = 0, s/d = 2, 5, 10, \alpha_0 = \omega r_0/V_s, S = N_{ST}/N_E$)

جمع بندی و نتیجه گیری

روش ساده بیان شده در این مقاله، روشی برای تعیین اثر بار قائم در بارگذاری هارمونیک جانبی دو شمع و گروه شمع می باشد. اندرکنش بین شمع و خاک توسط مدل وینکلر بر پایه کارهای Novak و بر اساس مدل پراکندگی و میرایی امواج ارائه شده است. ضریب اندرکنش دینامیکی (با حضور بار قائم) به صورت تحلیلی، می تواند براحتی برای محاسبه رفتار گروه شمع مورد استفاده قرار گیرد. روش ارائه شده بصورت خطی و الاستیک برای شمع و خاک بوده و نمی توان برای رفتارهای غیرخطی استفاده نمود. مزیت این روش سادگی، تحلیلی بودن، قابل فهم و کاربرد آسان خواهد بود.

به عنوان مثال، نتایج ارائه شده در نمودارها را می توان برای محدوده زیادی از فواصل بین دو شمع و فرکانس های بارگذاری ارائه نمود. این نتایج در فواصل کم، بسیار حساس بوده و ممکن است از دقت کافی برخوردار نباشد. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است:

- با افزایش فرکانس بدون بعد و فاصله بین دو شمع، مقادیر مطلق ضریب اندرکنش دینامیکی کاهش پیدا خواهد کرد.
- با افزایش ضریب بار، مقادیر ضریب اندرکنش دینامیکی افزایش پیدا خواهد کرد.
- با افزایش فرکانس بدون بعد و فاصله بین دو شمع، پراکندگی نتایج ناشی از اثر ضریب بار در مقابل ضریب اندرکنش دینامیکی کاهش پیدا خواهد کرد.

- Butterfield, R. & Banerjee, P. K. (1971). The elastic analysis of compressible piles and pile groups. *Geotechnique* 21, No.1, 43-60.
- Dobry, R., Vicente, E., O'Rourke, M. J., and Roesset, J. M. (1982). Horizontal stiffness and damping of single piles. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 108(3), 439-459.
- Gazetas, G. & Dobry, R. (1984). Horizontal response of piles in layered soils. *J. Geotech. Engrg Div ASCE* 110, 2-40.
- Kaynia, A. M. & Kausel, E. (1982a). Dynamic behaviour of pile groups. 2nd Inter. Conf Numer. Meth. Offshore Piling, Austin, Texas, 509-532.
- Kaynia, A. M. & Kausel, E. (1982b). Dynamic stiffness and seismic response of pile groups. Research Report R82-03, Massachusetts Institute of Technology.
- Michaelides, O., Gazetas, G., Bouckovalas, G., and Chryssikou, E. (1998). Approximate nonlinear dynamic axial response of piles. *Geotechnique*, London, 48(1), 33-54.
- Naylor, D. J. & Hooper, J. A. (1975). An effective stress finite element analysis to predict the short and long-term behaviour of a pile-raft foundation on London clay. *Symp. Settlement of Structures*, Cambridge.
- Nogami, T. (1980). Dynamic stiffness and damping of pile groups in inhomogeneous soil. Dynamic response of pile foundation. (eds M. O'Neill and R. Dobry). ASCE Special Technical Publication. New York: ASCE.
- Nogami, T. (1983). Dynamic group effect in axial responses of grouped piles. *J. Geotech. Engrg Div. ASCE* 109, 225-243.
- Novak, M., Nogami, T. and Aboul-Ella, (1978). Dynamic soil reactions for plane strain case, *J. eng. mech. div. ASCE* 104, 953-959.
- Novak, M. (1974). Dynamic stiffness and damping of piles. *Can. Geotech. J.* 11, No. 4, 574-598
- Novak, M. (1984). Evaluation of dynamic experiments on a pile group. *J. Geotech. Engrg Div. ASCE* 110, 738-756.
- Ottaviani, M. (1975). Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups. *Geotechnique* 25, No. 2, 159-174.
- Poulos, H. G. (1968). Analysis of the settlement of pile groups. *Geotechnique* No. 4, 449-471.
- Poulos, H. G. (1971). Behavior of laterally-loaded piles II: pile groups. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 91, No. 5, 733-751.
- Poulos, H. G. & Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. New York: Wiley.
- Randolph, M. F. (1981). The response of flexible piles to lateral loading. *Geotechnique* 31, No. 2, 247-259.
- Roesset, J. M. (1984). Dynamic stiffness of pile groups. *Pile foundations*. New York: ASCE.
- Sanchez-Salinero, I. (1983). Dynamic stiffness of pile groups. *Geotechnical Engrg. Rep GR83-5*, University of Texas at Austin.
- Sen, R., Davies, T. G. & Banerjee, P. K. (1985). Dynamic analysis of piles and pile groups embedded in inhomogeneous soils. *Earthquake engineering and struct. Dyn.* 13, 53-65.
- Sheta, M. & Novak, M. (1982). Vertical vibration of pile groups. *J. Geotech. Engrg Div. ASCE* 108, 570-590.
- Veletsos, A. S., and Dotson, K. W. (1986). Impedances of soil layer with disturbed boundary zone. *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 112(3), 363-368.
- Waas, G. & Hartmann, H. G. (1981). Analysis of pile foundations under dynamic loads. *Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technol.*, Paris.

A Simple Method for Determination of Effects of Vertical Load in Pile-Soil-Pile Interaction under Lateral Harmonic Loading

M. Ghazavi, KN Toosi University of Technology

P. Ravanshenas, KN Toosi University of Technology

Abstract

Destructive earthquakes have recently affected the response behavior of piles when they are under lateral loads. Many studies have recently been performed to gain insight into pile behaviors, but still there are many problems that need to further study. However, further studies can help addressing many problems that currently exist. In coastal structures, pile foundations are simultaneously exposed to vertical and lateral loads. Generally, piles are designed to bear excessive loads which are hidden in soft layers. Common designs do not include effect of vertical load on lateral interactions. In conventional methods, piles are separately designed in proportionate with the capacity of bearing the anticipated loads, then their place and status is determined. This article seeks to calculate pile-soil-pile lateral interactions under lateral harmonic bearing in the presence of static vertical load. For this purpose, dynamic interaction between two piles is focused in the form of an elastic-dynamical analysis which presented by Novak.

Keywords: *response behavior, pile, coastal structure, conventional methods, lateral load*