

رفتار کمانشی شمع‌ها در خاک‌های روانگرا*

جواد هدایتی^(۱) مسعود سلطانی محمدی^(۲) محمود یزدانی^(۳)

چکیده شمع‌ها در واقع ستون‌های لاغری هستند که به صورت جانبی متکی به خاک پیرامون خود می‌باشند. شمع‌هایی که از لایه‌های خاک روانگرا عبور می‌کنند، در اثر روانگرایی حاصل از زلزله، تکیه‌گاه جانبی خود را تا حد زیادی از دست می‌دهند. در این حالت شمع می‌تواند همانند ستون حمایت نشده، آمادگی برای ناپایداری محوری داشته باشد. این ناپایداری می‌تواند به کمانش جانبی شمع در جهت ضعیف‌تر و ایجاد مفصل مومسان بیانجامد. در سالیان گذشته موردهای زیادی از گسیختگی پی شمع‌های پل‌ها و ساختمان‌ها در اثر روانگرایی لایه‌های خاک پس از زلزله گزارش شده که فروریزش سازه‌های متکی به آنها را به همراه داشته است، در حالی که این شمع‌ها بیشتر بر مبنای آیین‌نامه‌های معتبری همچون JRA و NEHRP طراحی شده بودند. بنابراین، به نظر می‌رسد رفتار این گونه شمع‌ها و روش تحلیل آن‌ها به طور کامل شناخته شده نیست. در این پژوهش برای محاسبه ظرفیت کمانشی شمع‌ها در خاک‌های لایه‌ای روانگرا، از کمینه کردن کارمایه گرفته کل به روش عددی با در نظر گرفتن تغییر شکل مناسب برای شمع به روش ریلی- ریتز (Rayleigh-Ritz) استفاده شده است. همچنین با ارائه یک روش کاربردی برای ارزیابی کمانشی شمع‌ها در خاک‌های لایه‌ای، رابطه‌هایی برای محاسبه طول مؤثر شمع در خاک‌های روانگرا ارائه شده که به وسیله آن می‌توان با در اختیار داشتن سختی شمع و خاک و نیز ضخامت لایه روانگرا، نیروی کمانشی شمع را به دست آورد. این روش برای شمع‌های امتداد یافته که بیشتر در پایه پل‌ها به کار می‌رود نیز به کار می‌رود.

واژه‌های کلیدی شمع، کمانش، کارمایه نهفته کل، خاک روانگرا، طول مؤثر

Buckling Behavior of Piles in Liquefiable Soils

J. hedayati M. soltani Mohammadi M. Yazdani

Abstract In the realistic manner, piles are similar to the slender columns that soil around them acts as a lateral support. The piles situated in the liquefiable soil layers, loss their lateral supports due to the liquefaction resulted from the seismic ground motion. In this case, pile has the potency of axial instability similar to the unsupported columns. This instability can lead to the lateral buckling of the piles in the eak direction and creating the plastic hinges in the pile's badly. Many failures that acurr in the piles and their supported structures, due to the lique faction of soils after earthquakes has been reported. These piles are designed based on the creditable codes such as JRA and NEHRP. So it seems that the behavior and analysis methods of piles are still unknown. This research attempts to predict the buckling capacity of the piles in layered liquefiable soils, using a numerical method in which Rayleigh-Ritz approach was employed to minimize total potential energy. Furthermore, a new practical approach has been presented to calculate effective buckling length of pile in liquefiable soils. By the means of this approach the buckling capacity of pile could be obtained while the stiffness of pile and soil are accessible. This method can be also applied to the extended pile shafts in the bridge piers.

Key Words Pile, Buckling, Total Potential Energy, Liquefiable Soil, Effective Length.

*نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۸/۷/۱ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۹۱/۱/۱۶ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس

(۲) دانشیار، گروه مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس

(۳) استادیار، گروه مهندسی خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

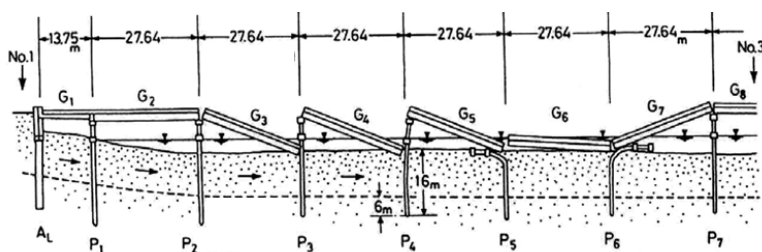
به اینکه کمانش شمع به صورت ناگهانی و بدون نشانه مشخص خطر از پیش رخ می‌دهد، بررسی پایداری شمع در اثر کمانش و محاسبه ظرفیت کمانشی شمع امری ضروری می‌باشد [4]. در سالیان اخیر روش‌های مختلف آزمایشگاهی و عددی برای بررسی رفتار کمانشی شمع، مورد استفاده قرار گرفته است. بهاتاچاریا و بولتون [3,5] به بررسی خرابی شمع‌ها در خاک‌های روانگرا پرداخته و ناهماهنگی بین یافته‌های دیگر پژوهشگران در خرابی شمع‌ها را با وضعیت و چگونگی خرابی واقعی آن‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. برای نمونه یکی از خرابی‌های مورد بررسی، چگونگی خرابی شمع‌های پل شووا در اثر زلزله ۱۹۶۴ نیگاتا بوده است. بسیاری از پژوهشگران مانند هامادا در سال ۱۹۹۲ [6] و ایشی‌هارا در سال ۱۹۹۳ [7]، خرابی این پل را گسترش جانبی دانسته‌اند. وضعیت این پل پس از خرابی در شکل (۱) و نمای خرابی آن در شکل (۲) مشاهده می‌شود.



شکل ۱ خرابی پل شووا در زلزله نیگاتا [3]

کاربرد شمع در سازه‌ها، دارای طیف بسیار گسترده‌ای است که از موردها استفاده آن‌ها می‌توان به پی پل‌ها، پی ساختمان‌های بلند ساخته شده در زمین‌های سست، پی اسکله‌ها و ... اشاره کرد [1]. پی‌های شمعی برای انتقال بار از خاک‌های سست به لایه‌های مقاوم در ژرفاهای بیشتر به کار می‌روند. بخشی از این انتقال بار به وسیله مقاومت اصطکاکی در طول شمع و بخشی دیگر با کمک مقاومت نوک شمع انجام می‌شود (شمع‌های اتکایی). با توجه به کاربرد گسترده شمع‌ها در سازه‌های مختلف، بررسی آن در بارهای جانبی مانند زلزله اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. خرابی‌های ایجاد شده در شمع‌ها در اثر زلزله به گونه‌ای بیان‌گر کاستی‌هایی است که در طراحی و یا ساخت آن‌ها وجود داشته است. بررسی خرابی‌ها و انجام مطالعات پس از روی دادن زلزله همواره منجر به پیشرفت در تحلیل و طراحی و توسعه ضابطه‌های مناسب‌تر در اجرا شده است. این پیشرفت‌ها و تغییرات در آیین‌نامه‌ها به طور گام به گام پس از هر زلزله صورت گرفته که برای نمونه می‌توان به تغییرات ایجاد شده در آیین‌نامه JRA (Japanese Road Association) [2] پس از زلزله کوبه اشاره کرد [3].

شمع‌هایی که از لایه‌های خاک روانگرا عبور می‌کنند در اثر روانگرایی حاصل از زلزله، نیروی جانبی کمتری به آن‌ها وارد می‌شود. در این حالت شمع می‌تواند همانند ستون حمایت نشده، آماده ناپایداری محوری باشد. این ناپایداری می‌تواند به کمانش جانبی شمع در جهت ضعیف‌تر و ایجاد مفصل مومسان بیانجامد. با توجه

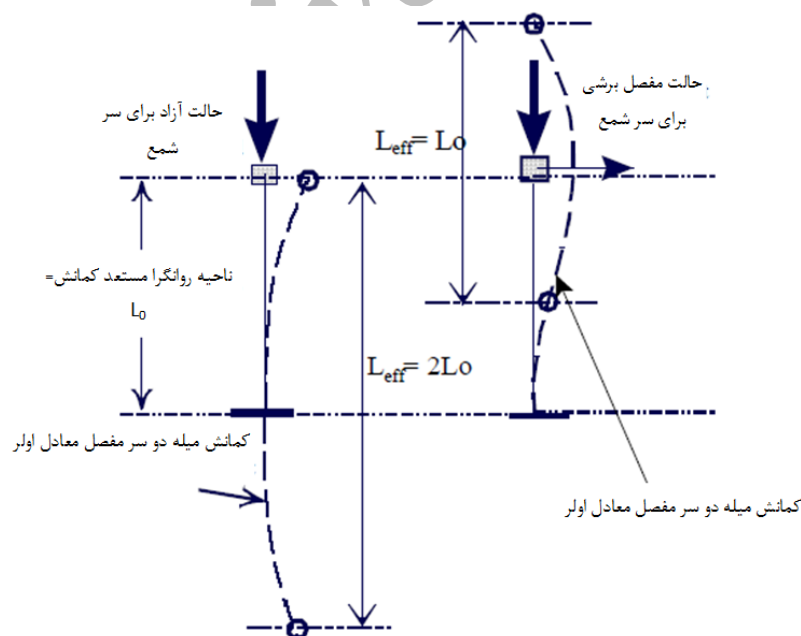


شکل ۲ نمایی از انحراف تیرهای پل شووا [3]

طول مؤثر شمع در خاک روانگرا را در حالت آزاد برای سر شمع، دو برابر ضخامت لایه روانگرا و برای حالت مفصل برشی برای سر شمع برابر ضخامت لایه روانگرا در نظر گرفته‌اند. این مقادارها بر اساس نظریه پایداری ستون‌ها و برابر شکل (۳) در نظر گرفته شده‌اند.

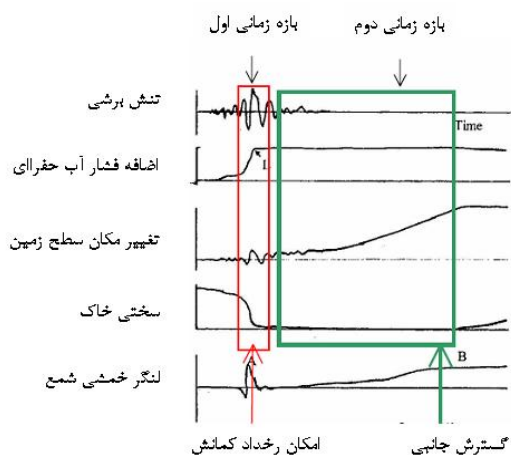
کومار و همکاران [9] با در نظر گرفتن گونه‌های مختلف خاک و ابعاد مختلف برای شمع با وارد کردن بار خروج از مرکز به بررسی رفتار کمانشی شمع در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. شرایط تکیه‌گاهی در نظر گرفته شده برای سر شمع مفصلی و برای نوک شمع گیردار بوده است. آن‌ها بر اساس تئوری پایداری ستون‌ها ضریب طول مؤثر شمع را برابر 0.7 ضخامت لایه روانگرا در نظر گرفتند. شانکر و همکاران [10] در سال ۲۰۰۷ با کمک روش شبه اجزای محدود به الگوسازی شمع در خاک‌های روانگرا پرداخته‌اند و عمق لایه روانگرا، سختی سازه شمع، لاغری شمع و شرایط تکیه‌گاهی را عامل‌های مؤثر در کمانش شمع معرفی کرده‌اند.

بهاتاچاریا و بولتون در پژوهش‌های خود به این نکته تمرکز کرده‌اند که شمع شماره P5 در جهت چپ و شمع شماره P6 در جهت راست تغییر شکل داده است. اگر علت خرابی شمع‌ها گسترش جانبی بوده باشد، شمع‌ها باید در جهت شیب تغییر شکل می‌دادند. افزون بر این در شمع‌های نزدیک ساحل رودخانه خرابی مشاهده نشده، درحالی‌که گسترش جانبی در این ناحیه بسیار شدید بوده است. همچنین در اثر گسترش جانبی می‌بایست مفصل پلاستیک در سطح بین لایه روانگرا و غیر روانگرا ایجاد شود. ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود در سه شمع این مفصل در بالای شمع ایجاد شده است. بنابراین، بر اساس نکته‌هایی که آورده شد، این دو پژوهشگر علت خرابی شمع‌های پل شووا را کمانش معرفی کرده‌اند. بهاتاچاریا همچنین با بررسی خرابی شمع‌های مختلف عبور کننده از لایه‌های خاک با آمادگی روانگرایی و نیز انجام آزمایش‌های مختلف، حد لاغری ۵۰ را برای رخ ندادن کمانش شمع پیشنهاد داده است [3,5]. بهاتاچاریا و همکاران [8] در پژوهش‌های خود



شکل ۳ میزان طول مؤثر شمع برای شرایط مرزی گوناگون [8]

گسترش جانبی، ممکن است در یک لحظه، اتکای جانبی شمع از بین برود و در اثر کاهش تنش های مؤثر و مقاومت برشی خاک، کمانش در شمع رخ دهد [3]. همچنین در محدوده زمانی دوم، پس از زلزله، روانگرایی منجر به افزایش چشم گیر تغییر مکان سر شمع نسبت به حالت غیرروانگرا می شود. اگر پس از روانگرایی، مقاومت باقی مانده خاک از تنش های برشی ایستای پدید آمده در اثر شیب یا یک سطح آزاد مانند ساحل رودخانه کمتر باشد، گسترش جانبی قابل توجه یا جابجایی شیب، ممکن است روی بدهد. در هنگام گسترش جانبی، توده خاک می تواند فشارهای ویران کننده ای را روی شمع ها وارد کند که منجر به خرابی کامل آن ها شود [12]. در طول زمین لرزه های ۱۹۶۴ نیگاتا، ۱۹۶۴ آلاسکا و ۱۹۹۵ کوبه، خرابی های بسیاری در سازه های متکی به شمع به ویژه پل ها رخ داده است، به طوری که در زلزله ۱۹۶۴ آلاسکا بیش از ۲۵۰ پل در اثر روانگرایی و حرکت جانبی زمین آسیب دیده اند [13].



شکل ۴ تاریخچه زمانی عامل های مختلف بر اساس پژوهش های یاسودا و بریل [3]

رفتار کمانشی شمع در خاک تک لایه

گیر و همکاران [4] برای بررسی رفتار کمانشی شمع ها در خاک تک لایه، توزیع ضریب واکنش افقی بستر خاک در

برای الگوسازی عددی کمانش شمع روش های مختلفی استفاده شده است. از آن جمله می توان به استفاده از الگو وینکلر برای الگوسازی اندرکنش شمع و خاک در خاک های روانگرا [11] و کمینه کردن کارمایه نهفته کل و محاسبه بار کمانشی شمع در خاک تک لایه [4] اشاره کرد. پژوهش های انجام شده در زمینه بررسی ظرفیت کمانشی شمع ها در خاک های چند لایه بسیار محدود و بیشتر با ساده سازی های بسیاری همراه بوده است [10]. هدف از این پژوهش ارائه روشی ساده و کاربردی برای محاسبه طول مؤثر شمع در خاک های چند لایه شامل لایه روانگرا می باشد که در آن اثر لایه های خاک غیر روانگرا در بالا و پایین لایه روانگرا در محاسبه طول مؤثر منظور می شود.

سازوکار روانگرایی و اثرهای آن بر شمع ها

تکان های شدید زلزله در ماسه های سست و بدون چسبندگی با سیلت کم که در زیر سطح سفره آب زیرزمینی قرار دارند، موجب افزایش فشار زیاد آب منفذی یا روانگرایی می شود. افزایش فشار آب منفذی منجر به از بین رفتن قابل توجه مقاومت و سختی خاک می شود. طراحی لرزه ای شالوده شمعی در خاک های روانگرا، مسئله ها و مشکل های بسیار پیچیده ای را در تحلیل و طراحی پدید می آورد. در خاک های با آمادگی روانگرایی، حتی پیش از آن که خاک به حالت روانگرایی کامل و سختی خاک به کمترین مقدار برسد، شالوده شمعی ممکن است در برابر تکان های قابل توجهی قرار گیرد. در طول زمان تکان خوردن، شمع آماده هر گونه آسیب (شامل گسترش ترک ها، ایجاد مفصل و در نهایت شکست) می باشد [12]. این آسیب ها را می توان در دو بازه زمانی متفاوت بررسی کرد. اول در طول مدت زلزله و دوم پس از روی دادن زلزله که در اثر حرکت توده خاک در زمین های شیب دار (گسترش جانبی (Lateral spreading)) می باشد. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، حتی در زمین های شیب دار پیش از روی دادن

x فاصله از ته شمع و y تغییر مکان جانبی شمع است. بنابراین، واکنش خاک که در واحد طول به شمع وارد می‌شود برابر است با مقدار تنش محاسبه شده در رابطه (۲) ضرب در قطر شمع (d):

$$q(x) = pd = m_h d (h-x)^{\omega} \xi^{1-\omega} y \quad \text{kN/m} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) تغییرهای q نسبت به y خطی فرض شده است.

معادله‌های تغییر شکل شمع با در نظر گرفتن گونه‌های مختلف شرایط مرزی بر اساس روش ریلی-ریتز در جدول (۱) ارائه شده است. این معادله‌ها شرایط تکیه‌گاهی را برای دو حالت یاد شده برآورد می‌کنند. میزان n در معادله‌های تغییر شکل، شمار جمله‌های نیم موج تابع‌های تغییر شکل است. کارمایه کرنشی سامانه شمع-خاک در اثر خمش شمع و تغییر شکل کشسان خاک (U) و کارمایه نهفته بارهای خارجی (V) به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$U + V = \frac{EI}{2} \int_0^L (y'')^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^h q(x) y dx - \frac{1}{2} \int_0^L P(x) (y')^2 dx \quad (۴)$$

که در آن EI سختی خمشی شمع، L طول کل شمع، h طول داخل در خاک، P(x) نیروی محوری، $y' = \frac{dy}{dx}$ و $y'' = \frac{d^2y}{dx^2}$ است.

با توجه به خطی بودن تغییرات اصطکاک جداره شمع نسبت به عمق، میزان P(x) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P(x) = P \left[1 - \psi \frac{(h-x)^2}{h^2} \right] \quad (x \leq h); \quad P(x) = P \quad (x > h) \quad (۵)$$

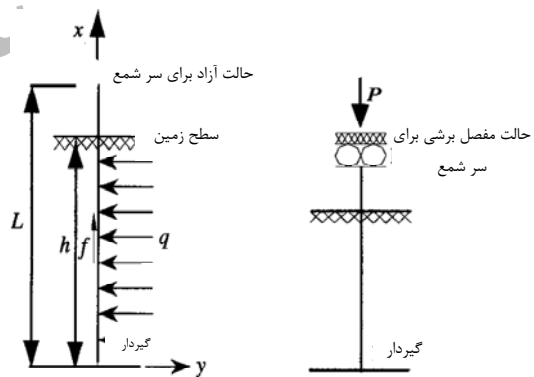
که P نیروی محوری وارده به سر شمع و ψ عامل تأثیر اصطکاک جداره شمع روی نیروی محوری شمع با تغییراتی بین صفر تا یک می‌باشد.

عمق را بر مبنای مطالعات ترزاقی [14] به صورت زیر در نظر گرفتند:

$$k_h = m_h Z^{\omega} \xi^{1-\omega} \quad (۱)$$

که در آن k_h برابر ضریب افقی واکنش بستر بر حسب kN/m^3 برابر نسبت این ضریب با عمق بر حسب kN/m^4 ، ξ یک مقدار ثابت است که برای برقراری برابری واحدها برابر یک متر در نظر گرفته می‌شود، ω برابر توان تجربی است که برابر یا بزرگتر از صفر در نظر گرفته می‌شود و Z عمق مورد نظر از سطح زمین است [15].

برای محاسبه ظرفیت کمانشی شمع از کمینه کردن کارمایه نهفته کل با در نظر گرفتن تغییر شکل مناسب برای شمع به روش ریلی-ریتز می‌توان بهره گرفت. برای مهار تغییر شکل‌های مختلف برای شمع، نه ترکیب مختلف از شرایط تکیه‌گاهی برای سر و ته شمع می‌توان در نظر گرفت که دو نمونه آن در شکل (۵) مشاهده می‌شود که محتمل‌تر از دیگر ترکیبات می‌باشند.



شکل ۵ شرایط مختلف تکیه‌گاهی برای شمع [4]

تنش وارده از طرف خاک به شمع بر اساس روش واکنش بستر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p = m_h (h-x)^{\omega} \xi^{1-\omega} y \quad (۲)$$

که در آن h طولی از شمع است که در خاک قرار گرفته،

معادله (۹) دارای پاسخ غیر صفر است در صورتی که درمیان ماتریس ضریب‌های آن صفر باشد. برای به‌دست آوردن ماتریس ضریب‌ها، معادله (۹) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$[A][C] = 0 \quad (11)$$

که در آن A همان ماتریس ضریب‌ها است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$[A] = [A1]_0^L + \alpha^5 \xi^{1-\omega} [A2]_0^h - \frac{P}{EI} [A3]_0^L + \frac{P\Psi}{EIh^2} [A4]_0^h \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) هر یک از ماتریس‌های A1 تا A4 ماتریس‌های $n \times n$ هستند که درایه سطر i ام و ستون j ام هر یک از آنها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$[A1]_{ij} = \int_0^L a_i'(x) a_j''(x) dx \quad (13)$$

$$[A2]_{ij} = \int_0^h (h-x)^\omega a_i(x) a_j(x) dx \quad (14)$$

$$[A3]_{ij} = \int_0^L a_i'(x) a_j'(x) dx \quad (15)$$

$$[A4]_{ij} = \int_0^h (h-x)^2 a_i'(x) a_j'(x) dx \quad (16)$$

در رابطه‌های بالا $a_i(x)$ جمله i ام از تابع‌های شکل ارائه شده در جدول (۱) است.

حال اگر درمیان ماتریس A برابر صفر قرار داده شود، مقدارهای مختلف P که هر یک معادل یک مود کمانشی برای شمع هستند، به‌دست می‌آید. کمترین مقدار به‌دست آمده برای P که معادل مود اول کمانش است، همان مقدار P_{cr} یا ظرفیت کمانشی شمع می‌باشد. با استفاده از این مقدار به راحتی می‌توان طول موثر شمع را به‌دست آورد [4].

رفتار کمانشی شمع در خاک‌های لایه‌ای

رابطه‌های ارائه شده برای بررسی کمانش شمع در بخش قبل برای یک خاک یک لایه بوده است. با توجه به این‌که در بیشتر موردها شمع از لایه‌های مختلف خاک با ویژگی‌های متفاوت عبور می‌کند، گسترش رابطه‌های

جدول ۱ تابع‌های تغییر شکل وابسته به شرایط مرزی متفاوت [4]

شرایط مرزی		تابع‌های تغییر شکل
سر	ته	
شمع (Top)	شمع (Tip)	$y(x) = \sum_{n=1}^k c_n \left[1 - \cos\left(\frac{2n-1}{2L} \pi x\right) \right]$
Free	Fixed	$y(x) = \sum_{n=1}^k c_n \left[1 - \cos\left(\frac{n}{L} \pi x\right) \right]$
Fixed, Sway	Fixed	$y(x) = \sum_{n=1}^k c_n \left[1 - \cos\left(\frac{n}{L} \pi x\right) \right]$

با جای‌گذاری رابطه‌های (۳) و (۵) در معادله (۴) می‌توان نوشت:

$$U + V = \frac{EI}{2} \int_0^L (y'')^2 dx + \frac{m_h d \xi^{1-\omega}}{2} \int_0^h (h-x)^\omega y^2 dx - \frac{P}{2} \int_0^L (y')^2 dx + \frac{P\Psi}{2h^2} \int_0^h (h-x)^2 (y')^2 dx \quad (6)$$

برای برقراری تعادل در سامانه، کارمایه کرنشی ذخیره شده باید برابر با کار نیروهای خارجی باشد که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\delta(U + V) = \frac{\partial(U + V)}{\partial C_i} \delta C_i = 0 \quad (7)$$

که در آن C_i ها ثابت‌های تابع‌های شکل هستند و با توجه به این‌که δC_i ها مقدارهای اختیاری تغییر مکان هستند، معادله (۷) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial(U + V)}{\partial C_i} = 0 \quad (8)$$

با قرار دادن معادله (۶) در (۸)، این معادله به‌دست می‌آید:

$$\int_0^L y'' \frac{\partial y''}{\partial C_i} dx + \alpha^5 \xi^{1-\omega} \int_0^h (h-x)^\omega y \frac{\partial y}{\partial C_i} dx - \frac{P}{EI} \int_0^L y' \frac{\partial y'}{\partial C_i} dx + \frac{P\Psi}{EIh^2} \int_0^h (h-x)^2 y' \frac{\partial y'}{\partial C_i} dx = 0 \quad (9)$$

که i مقدارهای صفر تا n را می‌گیرد و α سختی نسبی شمع خاک است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \sqrt{\frac{m_h d}{EI}} \quad (10)$$

مشخص می کنند و P_j و k_{hj} به ترتیب مقادیرهای نیروی محوری و ضریب واکنش جانبی هستند که P_j در رابطه (۴) به جای $P(x)$ و k_{hj} در رابطه های (۲)، (۳) و (۴) قرار می گیرد.

با قرار دادن رابطه تغییر یافته (۴) در معادله (۸) و انجام تابع اولیه گیری و جداسازی، معادله (۱۲) به شکل زیر در می آید:

$$[A] = EI[A1]_0^L + d[A2]_0^h - P[A3]_0^h + P[A4]_h^L \quad (19)$$

که درایه های ماتریس های A1 تا A4 از رابطه های زیر به دست می آیند:

$$[A1]_{ij} = \int_0^h a_i''(x) a_j''(x) dx \quad (20)$$

$$[A2]_{ij} = \int_0^h S_q(x) a_i(x) a_j(x) dx \quad (21)$$

$$[A3]_{ij} = \int_0^h S_p(x) a_i'(x) a_j'(x) dx \quad (22)$$

$$[A4]_{ij} = \int_h^L a_i'(x) a_j'(x) dx \quad (23)$$

در رابطه های بالا مقادیرهای $S_q(x)$ و $S_p(x)$ به توزیع k_h و P وابسته هستند و از رابطه های زیر محاسبه می شوند:

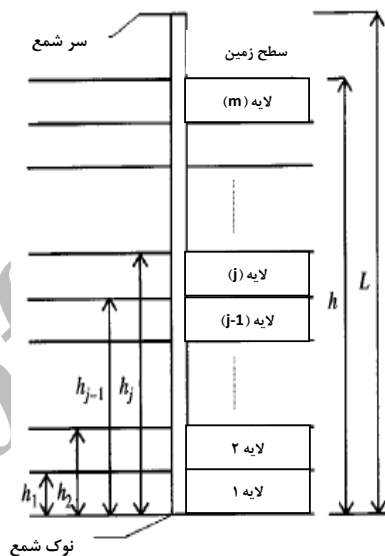
$$S_p(x) = \sum_{j=1}^m r_p(j) (u(x - h_{j-1}) - u(x - h_j)) \quad (24)$$

$$S_q(x) = \sum_{j=1}^m r_q(j) (u(x - h_{j-1}) - u(x - h_j)) \quad (25)$$

که در آن m شماره لایه ها؛ h_j فاصله بالای لایه j ام از کف شمع و u تابع پله ای است.

این تابع ها به صورت پله ای مقادیرهای P و k_h را در طول شمع توزیع می کنند که به ترتیب در شکل (۷) و شکل (۸) نمونه ای از آن ها مشاهده می شود.

ارائه شده در مرجع [4] برای خاک چند لایه ضروری به نظر می رسد. به این منظور، در این پژوهش این رابطه ها برای یک خاک چند لایه گسترش داده شده است و از آن برای الگوسازی رفتار کمانشی شمع های عبورکننده از خاک های روانگرا و گسترش رابطه هایی برای تعیین طول موثر شمع استفاده شده است. نمایی خاک چند لایه در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶ لایه بندی خاک

در این حالت، در دو رابطه نسبت به حالت تک لایه ای تغییر ایجاد می شود. نخست، در رابطه (۱) برای محاسبه توزیع واکنش جانبی در طول شمع، k_h و دوم در رابطه (۵) برای محاسبه توزیع نیروی محوری در شمع، $P(x)$ تغییر می کند. برای محاسبه k_h و $P(x)$ در خاک چند لایه یک مقدار k_{h0} و P_0 به عنوان مبنا در نظر گرفته می شود و با کاربرد یک ضریب در هر لایه میزان آن عامل در آن لایه به دست می آید. یعنی:

$$p_j = P_0 r_p(j) \quad (17)$$

$$k_{hj} = k_{h0} r_q(j) \quad (18)$$

که در رابطه های بالا r_p و r_q آرایه هایی هم بعد با شمار لایه های خاک هستند که به ترتیب تغییرات نیروی محوری و ضریب واکنش جانبی را در لایه های مختلف

که در آن E_0 ضریب تغییر شکل برحسب MPa، N عدد SPT و D قطر شمع بر حسب سانتیمتر است [16]. هنگامی که خاک روانگرا می‌شود، سختی خاک کاهش می‌یابد و بر اساس پژوهش‌های مختلف، این کاهش با کمک یک ضریب کاهشده بیان می‌شود. ایشی‌هارا [17] این ضریب را بین $0/001$ تا $0/01$ متغیر تعریف کرد. توکیماتسو [18] رابطه زیر را بر اساس افزایش تغییر مکان ارائه داد:

$$k_h = k_{hn} \frac{1}{1 + \left| \frac{y_r}{y_1} \right|} \quad (28)$$

که در آن y_r تغییر مکان نسبی بین شمع و خاک و y_1 مقدار مبنا برای y_r است.

همچنین، آیین‌نامه AIJ رابطه زیر را برای تعیین ضریب واکنش بستر در خاک روانگرا پیشنهاد می‌دهد [19]:

$$k_h = k_{hn} \frac{2\beta}{1 + \left| \frac{y_r}{y_1} \right|} \quad (29)$$

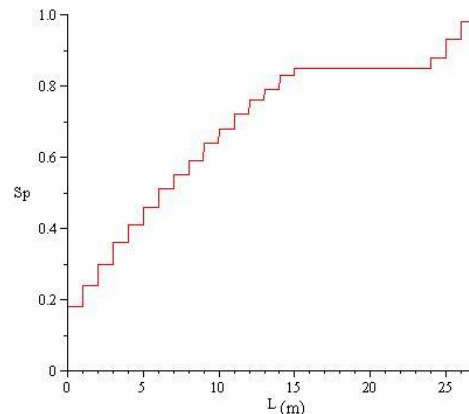
که در آن عامل‌هایی مانند رابطه (28) تعریف می‌شوند و مقدار β در خاک روانگرا برابر $0/1$ می‌باشد.

همان‌طور که دیده می‌شود سختی خاک پس از روانگرایی کامل بسیار ناچیز بوده و با توجه وابستگی آن به عامل‌های مختلف می‌توان در رابطه‌های طراحی، برای محاسبه بار کمانشی به صورت محافظه کارانه از آن صرف‌نظر کرد. بنابراین، در این پژوهش برای تعیین بار کمانشی لایه روانگرا بدون سختی منظور می‌شود.

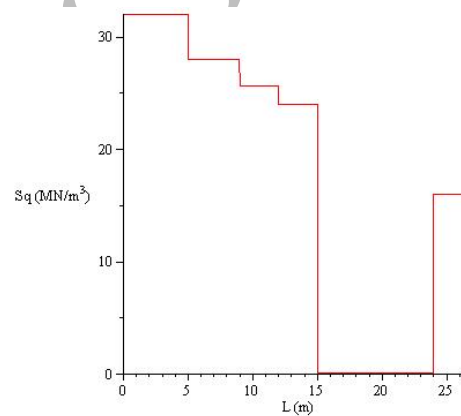
مقایسه نتیجه‌های حاصل از کمینه کردن کارمایه

نهفته و یک نرم‌افزار اجزای محدود

برای مقایسه نتیجه‌های حاصل از کمینه کردن کارمایه



شکل ۷ نمونه‌ای از تابع پله‌ای برای توزیع نیروی محوری در طول شمع



شکل ۸ نمونه‌ای از تابع پله‌ای برای توزیع k_h در طول شمع

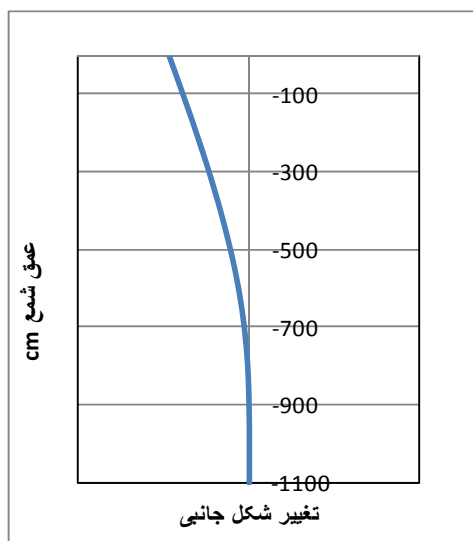
ضریب واکنش بستر در خاک روانگرا

یکی از روش‌های در نظر گرفتن ضریب واکنش بستر در خاک‌های مختلف، بیان رابطه آن با عدد SPT است که آن را انجمن معماری ژاپن (AIJ Architectural Institute of Japan) برای خاک‌های روانگرا به صورت زیر پیشنهاد کرده است:

$$k_{hn} = 80E_0D^{-0.75} \quad (26)$$

$$E_0 = 0.7N \quad (27)$$

اول کمانش شمع مشاهده می شود.

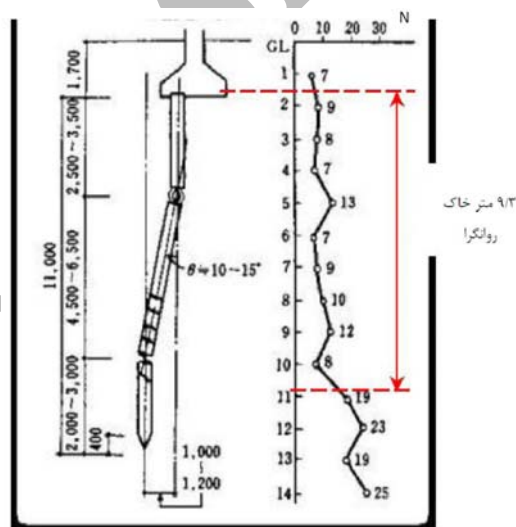


شکل ۱۰. مود اول کمانشی شمع ساختمان N.H.K با وارد کردن نیروی ۵۷/۲ تن

ب: الگوسازی در نرم افزار

در پژوهش حاضر برای الگوسازی شمع از نرم افزار اجزای محدود غیرخطی COM3 گسترش یافته در دانشگاه توکیو استفاده شده است [20]. این نرم افزار با استفاده از مجموعه ای از اجزای مختلف توانایی الگو کردن رفتار غیرخطی خاک و سازه های بتنی، در حالت های مختلف بارگذاری را دارا می باشد. برای الگوسازی شمع از جزء الیافی (Fiber element) استفاده شده است [21]. در این جزء مقطع عضوها به تعدادی سلول تقسیم بندی شده و با توجه به موقعیت سلولها، ویژگی های مصالح تعریف می شوند. برای شبیه سازی خاک پیرامونی شمع با توجه به رابطه های (۱)، (۲) و (۳) از فنرهای جدا از هم با فاصله های مشخص استفاده شده است. سختی فنرها با توجه به میزان k_i ، قطر شمع و فاصله فنرها از هم تعیین می شود. الگوی شمع در نیروی محوری افزایش فشاری با نمو یک تن نیرو قرار گرفته تا کمانش در شمع رخ دهد. در شکل (۱۱) تغییر شکل جانبی شمع تحت نیروهای ۵۷ و ۵۸ تن ارائه شده است. همانطور که

نهفته با نتیجه های حاصل از تحلیل اجزای محدود، بار کمانشی شمع های ساختمان N.H.K به هر دو روش تعیین شده است. ساختمان N.H.K یک ساختمان ۴ طبقه بتنی بوده که بر روی ۷۴ شمع بتنی به قطر ۳۵ سانتیمتر قرار داشته است. مانند شکل (۹) طول این شمع ها ۱۱ متر بوده که ۹/۳ متر آن در لایه روانگرا قرار داشته است. پس از زلزله نیکاتا در سال ۱۹۶۴ مشاهده شد که همه شمع ها آسیب دیده اند [6]. بنا به محاسبات ارائه شده در مرجع [3] نیروی کمانشی هر یک از شمع ها برابر ۵۲۰ کیلونیوتن گزارش شده است.

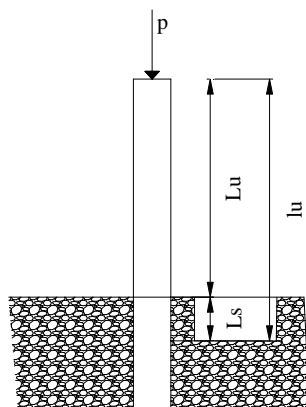


شکل ۹ چگونگی خرابی شمع ساختمان N.H.K [6]

الف: حل مساله با استفاده کمینه کردن کارمایه نهفته کل شرایط مرزی این شمع بنا به مرجع [6] به صورت گیردار در پایین و آزاد در بالا بوده است. میزان k_h در خاک غیر روانگرا بر اساس رابطه های (۲۶) و (۲۷) بر حسب قطر شمع و عدد SPT برابر ۸۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مکعب محاسبه شده است. با حل مساله بار بحرانی شمع در مود اول برابر ۵۷/۲ تن نیرو به دست آمده است. در شکل مود

$$l_u = L_s + L_u \quad (31)$$

که l_u طول آزاد برای محاسبه بارکمانشی و L_u طول مهار نشده شمع است.



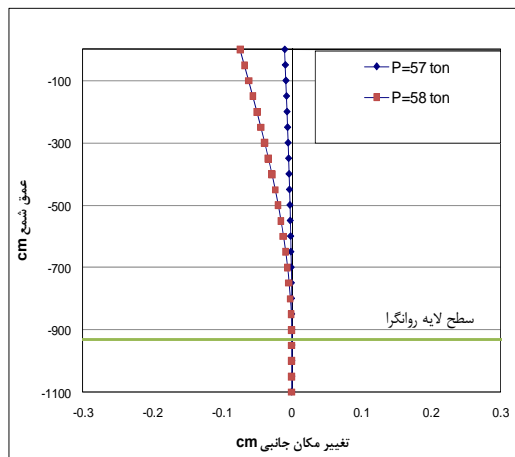
شکل ۱۲ شماتیک طول آزاد و طول لازم برای گیرداری برای شمع

مقدار k_h را می‌توان بر اساس پیشنهاد API-RP2A- American Petroleum Institute-Recommended (WSD Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design) [23] از نمودار شکل (۱۳) و یا به توصیه ACI543R-00 بر اساس جدول (۱) تعیین کرد. ACI543R-00 مقادیر داده شده در جدول (۲) را محافظه کارانه می‌داند [22].

جدول ۲ توصیه ACI برای k_h در خاک‌های مختلف [22]

نوع خاک	$k_h, \text{lb/in}^3$	$k_h, \text{kN/m}^3$
ماسه سست	۱/۵	۴۰۷
ماسه متوسط	۱۰	۲۷۱۰
ماسه متراکم	۳۰	۸۱۴۰
سیلت	۰/۴-۳	۱۰۹-۸۱۴
خاک نباتی	۰/۲	۵۴
رس	$67 S_u$	

مشاهده می‌شود، این شمع مذکور در بار ۵۸ تن دچار ناپایداری جانبی ناشی از کمانش شده و بار محاسبه شده از روش اجزای محدود در هماهنگی به نسبت خوبی با بار محاسبه شده به روش تحلیلی می‌باشد.



شکل ۱۱ تغییر شکل جانبی شمع در نیروی فشاری ۵۷ و ۵۸ تن

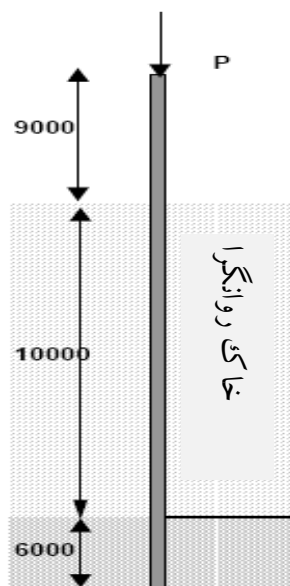
بررسی طول لازم برای گیرداری شمع

همان‌طور که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، در بسیاری از موارد، بخشی از شمع در ناحیه بالایی به صورت مهار نشده قرار دارد. همچنین، در موردهایی که شمع از یک لایه خاک با آمادگی روانگرایی عبور می‌کند، در این ناحیه با توجه به نبود مهار جانبی، توانایی کمانش دارد. طول این لایه بیانگر طول مهار نشده شمع می‌باشد. شرایط مرزی انتهای شمع وابسته به میزان قرارگیری شمع در خاک غیر روانگرا است (شکل (۱۲)). مطابق آیین‌نامه ACI543R-00 طول ناحیه عبور کننده از لایه غیر روانگرا (L_s) برای فراهم کردن گیرداری از رابطه زیر به دست می‌آید [22]:

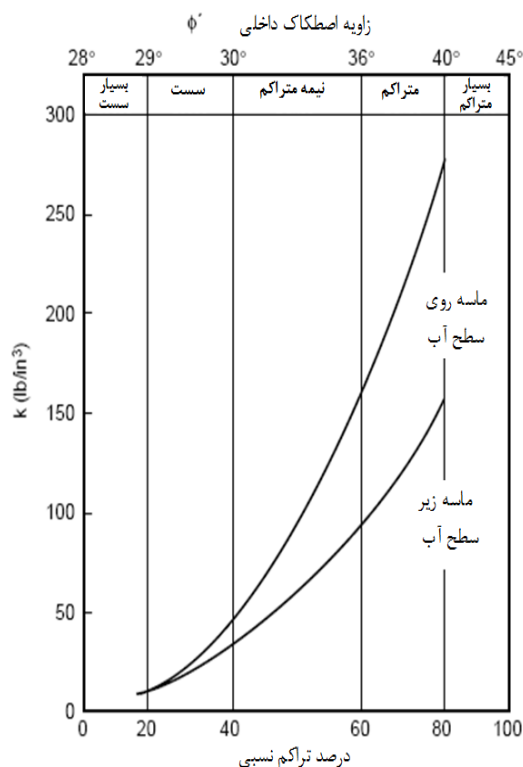
$$L_s = 1.8 \times \sqrt[5]{\frac{EI}{k_h}} \quad (30)$$

که در آن EI سختی خمشی شمع و k_h ضریب افقی واکنش بستر است. با توجه به رابطه (۳۰) طول آزاد برای محاسبه بار کمانشی از رابطه زیر به دست می‌آید:

لایه بندی خاک نیز در شکل (۱۴) آمده است.



شکل ۱۴ ویژگی‌های لایه‌های خاک در پیل شووا [3]



شکل ۱۳ نمودار محاسبه ضریب واکنش بستر [23]

پس از الگوسازی شمع به صورت انتهای گیردار و سر Fixed-Sway نتیجه‌های زیر به دست آمد:

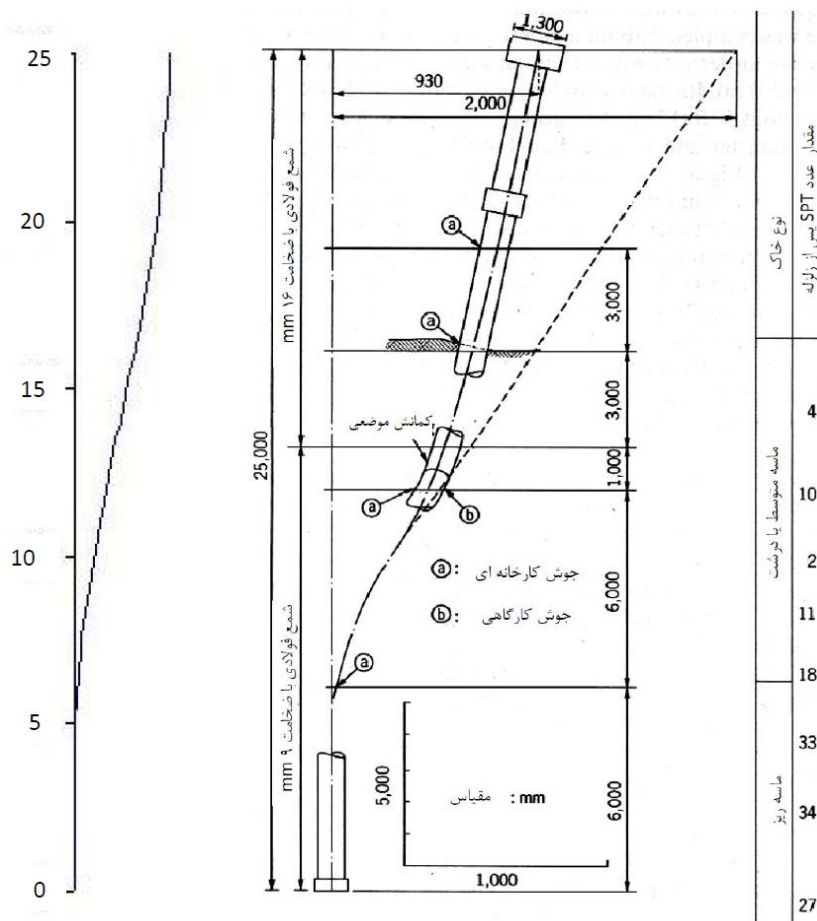
نیروی کمانشی بحرانی (P_{cr}) : $3443/64$ KN، طول مؤثر: $21/43$ m، طول لازم برای گیرداری: $19 = 2/43$ - $21/43$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، طول L_s به دست آمده از این برنامه در حدود $0.92 = \frac{2.43}{2.63}$ طول پیشنهادی ACI است که رابطه ACI محافظه‌کارانه به نظر می‌رسد. لازم به یادآوری است در این محاسبه سختی خاک روانگرا به صورت محافظه‌کارانه برابر صفر فرض شده است. شکل (۱۵) مود اول کمانش شمع به دست آمده از برنامه و مود خرابی مشاهده شده در محل را نشان می‌دهد.

برای واریسی این رابطه با استفاده از برنامه نوشته شده در خاک‌های لایه‌ای از شمع پیل شووا استفاده شده است. ویژگی‌های این شمع در جدول (۳) آمده است:

جدول ۳ ویژگی‌های شمع به‌کار رفته در پیل شووا

طول (m)	۲۵
نوع شمع	فولادی
قطر خارجی (m)	۰/۶۰۹
قطر داخلی (m)	۰/۵۹۱
ضریب کشسانی (GPa)	۲۱۰
K_h بر اساس API (MN/m^3)	۲۴
I (m^4)	۷/۶۳E-۴
L_s (m)	۲/۶۳



شکل ۱۵ مود اول کمانش شمع و مود خرابی شمع [3]

نسبت با ψ مشخص می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید:

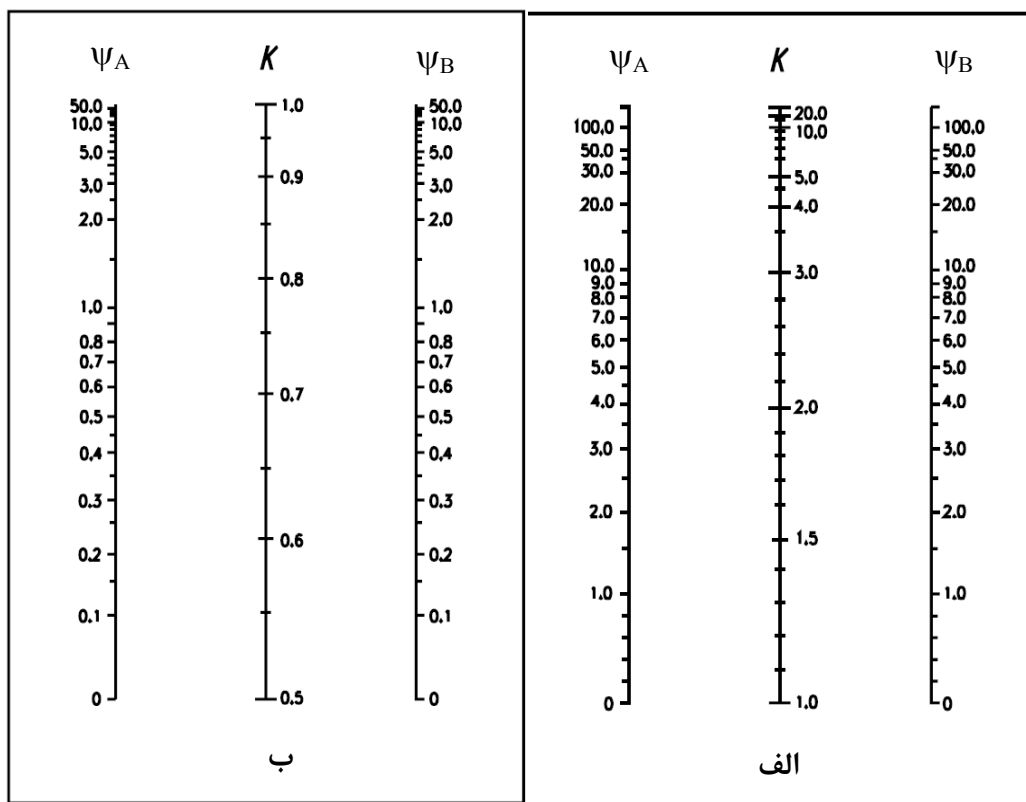
$$\psi = \frac{\sum K_C}{\sum K_b} = \frac{\sum EI_C / L_C}{\sum EI_b / L_b} \quad (32)$$

که در واقع سختی دورانی هر یک از جزءهای متصل به گره بر اساس روش توزیع لنگر و شیب افت برابر $4EI/L$ که ضریب ۴ در رابطه (۳۲) از صورت و مخرج ساده شده است. با محاسبه این نسبت در دو انتهای ستون میزان ضریب طول مؤثر با استفاده از نمودارهای شکل (۱۶) بدست می‌آید [24].

روش پیشنهادی برای برآورد طول مؤثر شمع در خاک با لایه روانگرای سطحی

تا کنون برای محاسبه طول مؤثر شمع پژوهش‌های بسیار محدودی صورت گرفته است. همچنان که رابطه‌های آیین‌نامه‌ای هم برای محاسبه این طول وجود ندارد. بنابراین، در این پژوهش تلاش شده رابطه‌هایی که برای محاسبه طول مؤثر ستون در قاب‌ها وجود دارد، گسترش داده شود تا با استفاده از این رابطه‌ها طول مؤثر شمع به دست آید.

ضریب طول مؤثر یک ستون در قاب تابعی از نسبت سختی ستون و تیرهای متصل به آن است. این



شکل ۱۶ نمودراف مربوط به محاسبه ضریب طول مؤثر
 (الف) ستون بدون حرکت جانبی (ب) ستون با حرکت جانبی [24]

در این رابطه E_c ضریب کشسانی بتن، I_g لنگر لختی مقطع ترک نخورده و β_d ضریبی است برای منظور کردن اثرات خزش بر بتن و فولاد در بارهای همیشگی که ACI مقدار 0.6 را برای حالتی که بار جانبی همیشگی وجود دارد و مقدار صفر را برای بار جانبی که همیشه نیست، پیشنهاد می کند.

همچنین در رابطه **Error! Reference source not found.** طول آزاد شمع و یا طول مهار نشده شمع در لایه روانگرا است.

I_s لنگر لختی خاک غیر روانگرا است که از تغییر شکل شمع پیشگیری می کند و همانند تیر متصل به شمع کار می کند. بنابراین، منطقی است که بیشترین ضخامتی از

با توجه به اینکه در شمع ها، خاک نقش اتکای جانبی را بازی می کند، باید رابطه (۳۲) به شکلی اصلاح شود که به جای سختی تیرها، سختی لایه ای از خاک در دو انتهای بخش روانگرا در نظر گرفته شود. بنابراین، در این مقاله رابطه (۳۲) به صورت زیر پیشنهاد می شود:

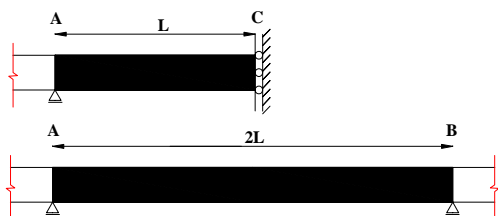
$$\psi = \frac{\gamma EI / L_u}{I_s k_h} \quad (33)$$

که در آن:

EI سختی خمشی شمع است که برای شمع های بتنی، ACI-318-05 رابطه زیر را ارائه می دهد [25]:

$$EI = \frac{0.4 E_c I_g}{1 + \beta_d} \quad (34)$$

نظر به صورت دو برابر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین معادله شیب افت بین دو نقطه A و B به صورت زیر به دست می‌آید:



شکل ۱۷ نمایی از جزء قابی با مفصل برشی

$$M_A = \frac{2EI}{2L} \left(2\theta_A + \theta_B - \frac{3\delta_{AB}}{2L} \right) \pm FEM_A \quad (39)$$

با توجه به تقارن و جهت مثبت دوران در روش

شیب افت (ساعتگرد) رابطه (۴۰) حاصل می‌شود:

$$\theta_A = -\theta_B \quad \& \quad \delta_{AB} = 0 \quad (40)$$

با جای‌گذاری رابطه (۴۰) در رابطه (۳۹) و

ساده‌سازی این رابطه به دست می‌آید:

$$M_A = \frac{EI}{L} \theta_A \pm FEM \Rightarrow \gamma = 1 \quad (41)$$

با توجه به موردهای یاد شده در بالا، می‌توان با محاسبه ψ در دو انتهای شمع از رابطه (۳۳)، مقدار ضریب طول مؤثر را از نمودار شکل (۱۶) و با کمک آن به سادگی نیروی کمانشی شمع را مانند ستون به دست آورد.

سنجش درستی روش پیشنهادی

برای بررسی این موضوع یک شمع بتنی به طول ۲۶ m با قطرهای متغیر در نظر گرفته شده است که در پایین گیردار و در بالا به صورت آزاد و یا مفصل برشی می‌باشد. خاک به صورت دو لایه اصلی که لایه بالایی، ماسه سست با آمادگی روانگرایی و لایه پایینی ماسه متراکم و یا رس در نظر گرفته شده است. سختی جانبی و اصطکاکی در لایه روانگرا به صورت محافظه‌کارانه، صفر

خاک که برای گیرداری شمع لازم است، برای محاسبه لنگر لختی خاک مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع بر اساس عامل‌های مورد نظر بررسی شده و در این پژوهش به تأیید رسیده است. بنابراین، برای محاسبه آن رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$I_s = \frac{d \cdot h^3}{12} \quad (35)$$

که در آن d قطر شمع و h برابر کمترین L_s و ضخامت لایه غیرروانگراست.

محاسبه ضریب γ

همان‌گونه که بیان شد ضریب سختی دورانی (γ) در حالتی که اتصال دو سر جزء صلب است برابر ۱ می‌باشد. ولی در شمع این ضریب باید با توجه به شرایط تکیه‌گاهی دو سر شمع تعیین شود.

الف: حالت آزاد برای سر شمع

در این حالت با نوشتن رابطه شیب افت برای دو سر شمع این رابطه‌ها را می‌توان نوشت:

$$M_f = \frac{2EI}{L} \left(2\theta_f + \theta_r - \frac{3\delta}{L} \right) \pm FEM_{fr} \quad (36)$$

$$M_r = \frac{2EI}{L} \left(2\theta_r + \theta_f - \frac{3\delta}{L} \right) \pm FEM_{rf} \quad (37)$$

که در آن زیرنویس‌های f و r به ترتیب بیان‌گر انتهای آزاد و گیردار شمع هستند. با توجه به شرایط تکیه‌گاهی M_f برابر صفر است، پس می‌توان نوشت:

$$M_r = \frac{2M_r - M_f}{2} = \frac{3EI}{L} \left(\theta_r - \frac{\delta}{L} \right) \pm (FEM_{rf} - 0.5FEM_{fr}) \Rightarrow \gamma = 3 \quad (38)$$

ب: در حالت مفصل برشی (Fix-Sway) برای سر شمع در این حالت برای محاسبه سختی دورانی نخست با توجه اصل تقارن در قاب‌ها، مانند شکل (۱۷)، جزء مورد

برای حالت آزاد و مفصل برشی به عنوان ψ در بالا در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از نمودار شکل (۱۶)، و در اختیار داشتن ψ در دو انتهای شمع، مقدارهای ضریب طول موثر با استفاده از نمودار (K_{AB}) نیز محاسبه شد. با مقایسه مقدارهای λ و K_{AB} مشاهده شد که هماهنگی قابل توجهی بین دو روش وجود دارد. شماری از نتیجه‌های حاصل شده در جدول (۴) وابسته به حالت آزاد و جدول (۵) وابسته به حالت مفصل برشی آمده است.

فرض شده است. در هر الگو با استفاده از برنامه تهیه شده، مقدار P_{cr} محاسبه شد و از روی آن مقدار طول موثر با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

$$L_e = \pi \sqrt{\frac{EI}{P_{cr}}} \quad (42)$$

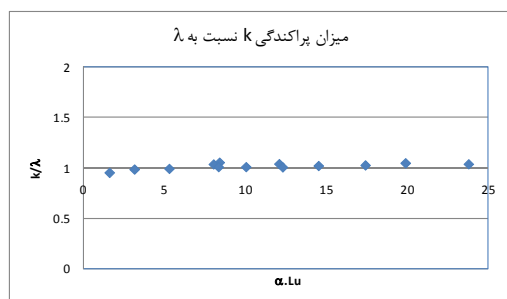
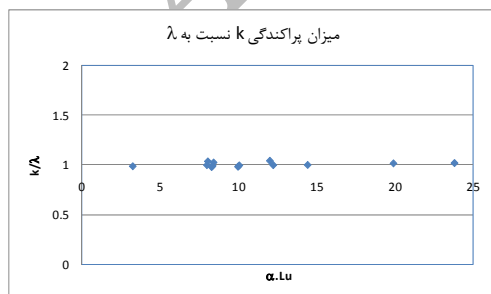
میزان ضریب طول موثر برابر نسبت طول موثر به طول آزاد است که به صورت تحلیلی به دست می‌آید (λ). همچنین، مقدار ψ در پایین شمع با استفاده از رابطه (۳۳) به دست آمد و مقدارهای ۱۰۰ و صفر به ترتیب

جدول ۴ نتیجه‌های وابسته به حالت آزاد برای سرشمع

شماره نمونه	1	2	3	4	5	6	7
قطر شمع (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.6	1
kh(kN/m ³)	20000	24000	32000	16000	16000	24000	24000
EI(kN.m ²)	29263.31	29263.31	29263.31	29263.31	3792.53	60680.40	468212.98
Pcr(KN)	615.35	262.68	388.56	602.05	88.30	761.39	3576.00
L_0 (m)	9	15	12	9	9	12	15
L_e (m)	21.66	33.16	27.26	21.90	20.59	28.05	35.95
λ	2.407	2.211	2.272	2.434	2.288	2.337	2.397
L_s (m)	1.942	1.873	1.768	2.031	1.350	2.167	3.261
I_s (m ⁴)	0.305	0.274	0.230	0.349	0.061	0.509	2.889
3EI/L ₀ (kN.m)	9754.437	5852.662	7315.828	9754.437	1264.175	15170.101	93642.596
$I_s \times Kh$ (kN.m)	6106.78	6568.78	7369.88	5585.32	983.47	12209.59	69340.48
ψ_{up}	100	100	100	100	100	100	100
ψ_{down}	1.60	0.89	0.99	1.75	1.29	1.24	1.35
K_{AB}	2.43	2.21	2.24	2.47	2.33	2.31	2.37
درصد اختلاف	0.95	0.03	1.41	1.49	1.85	1.16	1.11

جدول ۵ نتیجه‌های وابسته به حالت مفصل برشی برای سرشمع

شماره نمونه	1	2	3	4	5	6	7
قطر شمع (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.6	1
kh(kN/m3)	20000	24000	32000	16000	16000	24000	24000
EI(kN.m2)	29263.31	29263.31	29263.31	29263.31	3792.53	60680.40	468212.98
Pcr(KN)	2458.85	1054.29	1585.65	2494.49	375.92	3076.71	14306.97
Lu(m)	9	15	12	9	9	12	15
Le(m)	10.84	16.55	13.50	10.76	9.98	13.95	17.97
λ	1.204	1.103	1.125	1.196	1.109	1.163	1.198
Ls(m)	1.94	1.87	1.77	2.03	1.35	2.17	3.26
Is(m4)	0.305	0.274	0.230	0.349	0.061	0.509	2.889
3EI/L _u (kN.m)	3251.48	1950.89	2438.61	3251.48	421.39	5056.70	31214.20
I _s ×Kh(kN.m)	6106.78	6568.78	7369.88	5585.32	983.47	12209.59	69340.48
ψ_{up}	0	0	0	0	0	0	0
ψ_{down}	0.53	0.30	0.33	0.58	0.43	0.41	0.45
K _{AB}	1.19	1.1	1.12	1.19	1.15	1.14	1.17
درصد اختلاف	1.18	0.31	0.42	0.47	3.72	1.95	2.35

شکل ۱۸ میزان پراکندگی k نسبت به λ در حالت آزاد برای سر شمعشکل ۱۹ میزان پراکندگی k نسبت به λ در حالت مفصل برشی برای سر شمع

در این جدول‌ها سطرهای اول تا سوم ورودی برنامه، سطرهای چهارم تا ششم خروجی برنامه است. یعنی λ ضریب طول مؤثر به دست آمده از برنامه است. همچنین، سطرهای هفتم تا دوازدهم مرحله‌های محاسبه k_{AB} یا همان ضریب طول مؤثر با استفاده از نمودار است. با مقایسه مقادیرهای مختلف λ و k_{AB} و محاسبه میزان اختلاف، نتیجه می‌شود که برای مهار کمانش شمع به راحتی می‌توان از نمودارهای ستون استفاده نمود.

برای مقایسه بهتر نتیجه‌ها میزان پراکندگی λ و k_{AB} بر حسب یک عامل بدون بعد محاسبه شده است. این عامل بدون بعد به صورت $\alpha \times L_u$ در نظر گرفته شده است که در آن α از رابطه به دست می‌آید که واحد آن m^{-1} است. نتیجه‌ها برای حالت آزاد در شکل (۱۸) و برای حالت مفصل برشی در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود.

که در آن x فاصله از سر شمع، M لنگر در فاصله x ، p نیروی محوری وارد بر نوک شمع، K سختی فنر معادل، δ تغییر مکان در نقطه $x=0$ ، δ_1 تغییر مکان در نقطه $x = \frac{t_s}{4}$ و δ_2 تغییر مکان در نقطه $x = \frac{3t_s}{4}$ است. با تقسیم دو طرف رابطه (۴۳) بر EI و جای گذاری y'' به جای $\frac{M}{EI}$ این رابطه به دست می آید.

$$y'' = \frac{p}{EI}(\delta - y) - \frac{K}{2EI} \delta_1 \left(x - \frac{t_s}{4}\right) - \frac{K}{2EI} \delta_2 \left(x - \frac{3t_s}{4}\right) \Rightarrow$$

$$y'' + \frac{p}{EI}y + \frac{K}{2EI}x(\delta_1 + \delta_2) - \frac{p}{EI}\delta - \frac{K.t_s}{8EI}(\delta_1 + 3\delta_2) = 0 \quad (44)$$

شرایط مرزی معادله دیفرانسیل بالا به شرح زیر است:

$$y(0) = \delta \quad \text{and} \quad y\left(\frac{t_s}{4}\right) = \delta_1 \quad \text{and} \quad y\left(\frac{3t_s}{4}\right) = \delta_2$$

$$y(L+t_s) = 0 \quad \text{and} \quad y'(L+t_s) = 0 \quad (45)$$

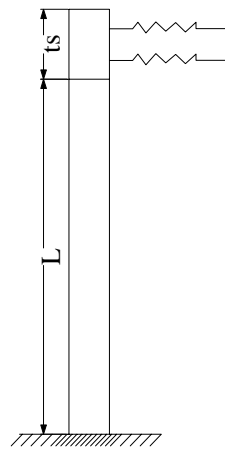
که در این معادلات L طول ناحیه روانگرا به علاوه طول لازم برای گیرداری یا Ls در لایه پایینی است.

با حل این معادله به صورت عددی مقدارهای مختلف ضریب طول مؤثر به ازای مقدارهای مختلف $\frac{KL^3}{EI}$ به دست می آید. مقدارهای ضریب طول مؤثر به ازای سختی و ضخامت زیاد لایه فوقانی به سمت $0/5$ میل می کنند. در شکل (۲۱) پاسخ این معادله مشاهده می شود. همچنین در شکل (۲۲) بزرگنمایی این پاسخ در مقدارهای ابتدایی $\frac{KL^3}{EI}$ آشکار است.

نکته قابل توجه در این حالت کاهش نیروی محوری شمع در اثر اصطکاک لایه فوقانی است. به این معنی که نسبت نیروی محوری شمع در لایه روانگرا به نیروی وارد شده کوچکتر از یک است که این نسبت β_p نامیده می شود. با توجه به این موضوع به راحتی می توان نتیجه گرفت نیروی کمانشی به دست آمده از روش تحلیلی β_p برابر کوچکتر از نیروی محاسبه شده از روی نمودار است.

روش پیشنهادی برای برآورد طول مؤثر شمع در خاک با لایه روانگرای غیر سطحی

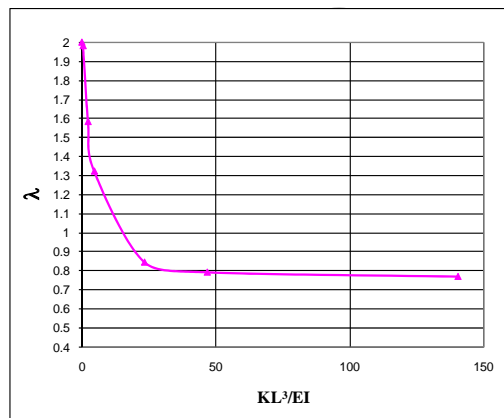
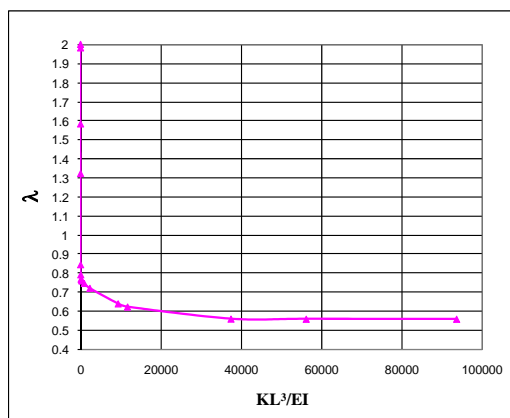
در بسیاری موردها لایه روانگرا میان دو لایه غیر روانگرا قرار گرفته و شمع با عبور از لایه روانگرا بر لایه زیرین متکی می شود. در این حالت خاک لایه فوقانی بسته به ضخامت و سختی آن شرایط مرزی متفاوتی را برای شمع ایجاد می کند که در تعیین طول کمانشی آن باید مورد توجه قرار گیرد. در این حالت لایه فوقانی خاک مانع تغییر شکل جانبی خاک می شود و اگر میزان سختی و ضخامت آن زیاد باشد، در برابر دوران سر شمع نیز مقاومت می کند (حالت نیمه گیردار). بنابراین، در این حالت نمی توان مانند حالت های قبلی از نمودار استفاده کرد. زیرا وجود و یا نبود تغییر مکان جانبی که به سختی و ضخامت لایه فوقانی بستگی دارد، مشخص نیست. از این رو، برای تحلیل این حالت لایه خاک فوقانی به صورت دو فنر با سختی معادل $\frac{K}{2} = \frac{k_n \times d \times t_s}{2}$ و در $0/25$ و $0/75$ لایه فوقانی در نظر گرفته شد تا افزون بر مقاومت در برابر تغییر مکان، مقاومت خاک در برابر دوران شمع نیز لحاظ شود. سپس، معادله دیفرانسیل زیر برای نسبت های مختلف $\frac{KL^3}{EI}$ به صورت عددی حل شد و مقدارهای مختلف طول مؤثر به دست آمد. این معادله دیفرانسیل بر اساس شکل (۲۰) به شرح زیر است.



شکل ۲۰ چگونگی الگوی خاک بالایی با دو فنر

از قبل وارد شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، درصد اختلاف نیروی کمانشی حاصل از تحلیل P_{cr1} با نیروی کمانشی حاصل از حل معادله دیفرانسیل P_{cr2} در حد قابل قبول قرار دارد. بنابراین، می‌توان از این روش برای محاسبه نیروی کمانشی شمع استفاده کرد.

حال مانند حالت قبل یک شمع به طول ۲۶ متر با مقطع‌های مختلف در نظر گرفته شده و تأثیر لایه فوقانی بر بار کمانشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مقایسه نتیجه‌های حاصل از تحلیل و این نمودار در جدول (۶) آمده است. در این جدول برای راحتی کار تنها مقایسه نیروهای کمانشی انجام گرفته است. همچنین ضریب β_p



شکل ۲۲ بزرگنمایی پاسخ معادله دیفرانسیل در مقدارهای ابتدایی

شکل ۲۱ نمودار پاسخ معادله دیفرانسیل

جدول ۶ مقایسه نتیجه‌های حاصل از تحلیل با نتیجه‌های حاصل از حل معادله دیفرانسیل

شماره نمونه	1	2	3	4	5	6	7
d (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.6	1
k_{bu} (kN/m ³)	24000	4000	16000	8000	8000	32000	3000
k_{bb} (kN/m ³)	24000	16000	32000	20000	24000	24000	20000
EI (kN.m ²)	29263	29263	29263	29263	3793	60680	468213
t_s (m)	1	1	1	2	3	5	2
P_{cr1} (kN)	2892	2556	4376	2040	1805	15739	40157
Lu (m)	12	12	9	15	6	9	6
L_{sb} (m)	1.87	2.03	1.77	1.94	1.24	2.17	3.38
K (kN/m)	12000	2000	8000	8000	7200	96000	6000
$KL^3 / 3EI$	1094.8	188.8	341.3	1329.5	721.8	2203.0	10.6
β_p	0.97	0.99	0.98	0.96	0.96	0.9	0.985
P_{cr2} (kN)	2793	2525	4219	1922	1699	14949	41241
درصد اختلاف	3.43	1.21	3.59	5.79	5.89	5.02	2.70

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی برای محاسبه نیروی کمانشی شمع‌ها در خاک‌های چند لایه و با حضور لایه روانگرا و شرایط مرزی مختلف ارائه شد. مطابق با روش پیشنهادی ابتدا باید فاصله لایه روانگرا از سطح زمین مشخص شود. در صورتی که لایه روانگرا از سطح زمین آغاز شود، می‌توان از روش اول و با استفاده از نمودار بر اساس میزان $1/3$ محاسبه شده در انتهای پایینی، ضریب طول مؤثر محاسبه می‌شود و از روی آن نیروی کمانشی به دست آید. در صورتی که لایه روانگرا از یک عمق مشخص شروع شود، خاک غیر روانگرایی بالایی تغییر شکل بالای شمع را محدود می‌کند و دیگر نمی‌توان از نمودار (نموگراف) برای محاسبه ضریب طول مؤثر استفاده کرد. زیرا در این حالت با توجه به سختی و ضخامت لایه غیر روانگرایی بالایی، علاوه بر تغییر مکان بالای شمع دوران آن نیز در بالا محدود می‌شود و شرایط تکیه‌گاهی قسمت بالایی شمع بین حالت آزاد تا گیردار کامل متغیر است. بنابراین، به صورت دقیق نمی‌توان تعیین کرد که

کدام نمودار را (با وجود تغییر مکان جانبی و یا بدون وجود آن) برای محاسبه ضریب طول مؤثر به کار برد. برای حل این مشکل با حل معادله دیفرانسیل کمانش با در نظر گرفتن دو فنر (برای مهار تغییر مکان و دوران قسمت بالایی) در بالای شمع، بر اساس مقادیرهای مختلف نسبت سختی محوری فنر و سختی جانبی شمع، مقادیر مختلف برای ضریب طول مؤثر محاسبه شد که در نمودار شکل (۲۱) آمده است. این مقادیرها بین ۲ برای حالت آزاد، تا $0/5$ برای حالت گیردار کامل متغیر است و بر اساس آن می‌توان نیروی کمانشی شمع را محاسبه کرد. برای محاسبه نیروی کمانشی شمع با در نظر گرفتن سختی خاک در لایه‌بندی دقیق‌تر نیز باید معادله دیفرانسیل کمانش حاصل از کمینه کردن کارمایه نهفته کل در خاک‌های لایه‌ای حل شود. همان‌طور که اشاره شد برنامه‌ای برای این کار تهیه شده است که به وسیله آن نیز می‌توان نیروی کمانشی شمع را در محدوده خطی به صورت دقیق محاسبه کرد.

مراجع

1. Bhattacharya, S., Dash, S. R., and Adhikari, S., "On the mechanics of failure of pile-supported structures in liquefiable deposits during earthquakes", *Current Science*, 94 (5), (2008).
2. JRA: Japanese Road Association, Specifications for highway bridge, Part V, Seismic Design, (1996,1980,1972).
3. Bhattacharya, S., "Pile instability during earthquake liquefaction," PhD thesis, University of Cambridge, Cambridge, UK, Sep, (2003).
4. Gabr, M., A., Wang, J., J., Zhao, M., "Buckling of piles with general power distribution", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, no. 2, pp. 123-130, (1997).
5. Bhattacharya S., Bolton M., "Errors in design leading to pile failures during seismic liquefaction," *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, NY, Apr. (2004).
6. Hamada, M., "Large ground deformations and their effects on lifelines: 1983 Nihonkai-Chubu earthquake," Case Studies of liquefaction and lifelines performance during past earthquake, Technical Report NCEER-92-0001, Volume-1, Japanese case studies, National Centre for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, (1992).
7. Ishihara, K., "Liquefaction and flow failure during earthquakes," Rankine lecture, *Geotechnique* 43, No 3, pp 351-415, (1993).
8. Bhattacharya, S., Madabhushi, S. P. G., Bolton, M., "Pile instability during earthquake liquefaction,"

- ASCE Engineering Mechanics Conference (EM2003), Seattle, 16-18th July, (2003).
9. Kumar, P. S., Karuppaiah K. B., Parameswaran P., "Buckling behavior of partially embedded reinforced concrete piles in sand," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2 (4), Aug. (2007).
 10. Shanker, K., Basudhar, P. k., Patra, N. R., "Buckling of Piles under Liquefied Soil Conditions," *geotechnical and Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 25, pp. 303-313, (2007).
 11. Nath, U.K., Maheshwari, B.K., Ramasamy, G., "PILE-SOIL MODELING CONSIDERING LIQUEFACTION –AN OVERVIEW," *Advances in Bridge Engineering*, March, (2006).
 12. Finn W.D.L. and Fujita N. "Piles in liquefiable soils: seismic analysis and design issues," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 22, pp.731-742, (2002).
 13. Hwang J.L., Kim C.Y., Chung C.K., Kim M.M., "Viscous fluid characteristics of liquefied soils and behavior of piles subjected to flow of liquefied soils," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, pp. 313-323, (2006).
 14. Terzaghi, K. "Evaluation of coefficients of subgrade reaction," *Geotechnique*, Vol. 5, pp. 297-326, (1955).
 15. Rowe, P. W. "The single pile subject to horizontal force," *Geotechnique*, Vol. 6, no. 2, pp. 70-85, (1956).
 16. Meera, R. S., Shanker K., Basudhar P. K., "Flexural response of piles under liquefied soil conditions," *Geotechnical and geological Engineering*, Springer, 25 (3), pp. 409-422, (2007).
 17. Ishihara, K. "Geotechnical aspects of the 1995 Kobe earthquake, " *In: Proceedings of the 14th international conference on soil mechanics and foundation engineering*. Terzaghi Oration, Hamburg, 2047–2073, (1997).
 18. Tokimatsu, K. "Performance of pile foundations in laterally spreading soils," *Proc 2nd international conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, Portugal, 957–964, (1999).
 19. Bhattacharya, S., Madabhushi, S. P. G., "A critical review of methods for pile design in seismically liquefiable soils," *Bull earthquake Engineering*, Springer, no. 6, pp. 407-446, (2008).
 20. Maekawa, K., "General Information for Com3 Version 9.11 in Multi-Com," Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Jul. (2006).
 21. Maekawa K., Pimannas, A., Okamura, H., "Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete," SPON Press, (2003).
 22. ACI 543R-00, "Design, Manufacture, and Installation of Concrete Piles", Reported by ACI Committee 543, (2000).
 23. American Petroleum Institute "API Recommend Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD)" Twenty-first Edition, December (2000).
۲۴. مستوفی‌نژاد، داود، سازه‌های بتن‌آرمه (جلد اول)، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، (۱۳۸۶).
25. ACI 318-05, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary-ACI 318R-05", American Concrete Institute, Farming Hills, MI, USA, (2005).