

رفتار کمانشی شمع‌ها در خاک‌های روانگرا

جواد هدایتی، دانشجوی دکترای مهندسی زلزله دانشگاه تربیت مدرس
مسعود سلطانی محمدی، دانشیار گروه مهندسی زلزله دانشگاه تربیت مدرس
محمود یزدانی، استادیار گروه مهندسی خاک و پی دانشگاه تربیت مدرس
Email: hedayati_javad@modares.ac.ir

چکیده

شمع‌ها در واقع ستون‌های لاغری هستند که به صورت جانبی متکی به خاک اطراف 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 مستعد ناپایداری محوری قرار گیرد. این ناپایداری می‌تواند باعث کمانش جانبی شمع در جهت ضعیف‌تر و ایجاد مفصل پلاستیک شود. در سال‌های گذشته موارد زیادی از گسیختگی پی شمعی پل‌ها و ساختمان‌ها در اثر روانگرایی لایه‌های خاک پس از زلزله گزارش شده است که فروریزش سازه‌های متکی به آنها را به همراه داشته است در حالی که این شمع‌ها اغلب بر پایه آیین‌نامه‌های معتبری همچون JRA و NEHRP طراحی شده بودند. لذا به نظر می‌رسد رفتار این گونه شمع‌ها و روش تحلیل آنها به طور کامل شناخته شده نیست. در این تحقیق برای محاسبه ظرفیت کمانشی شمع‌ها در خاک‌های لایه‌ای روانگرا، از کمینه کردن انرژی پتانسیل کل به روش عددی با در نظر گرفتن تغییر شکل مناسب برای شمع به روش ریلی-ریتز¹ استفاده شده است. همچنین با ارائه یک روش کاربردی جهت ارزیابی کمانشی شمع‌ها در خاک‌های لایه‌ای، روابطی برای محاسبه طول مؤثر شمع در خاک‌های روانگرا ارائه شده است که به وسیله آن می‌توان با در اختیار داشتن سختی شمع و خاک و نیز ضخامت لایه روانگرا، نیروی کمانشی شمع را بدست آورد. این روش برای شمع‌های امتداد یافته که بیشتر در پایه پل‌ها به کار می‌رود نیز به کار می‌رود.

کلمات کلیدی: شمع، کمانش، انرژی پتانسیل کل، خاک روانگرا، طول مؤثر

Abstract

As a matter of fact, piles are similar to slender columns that soil around them act as a lateral support. Those piles situated in liquefiable soil layers undergo lower lateral forces because of liquefaction due to seismic ground motion. In this case pile has potential of axial instability like unsupported columns and this phenomenon can constitute lateral buckling of piles in the weak direction and result in plastic hinges in the pile's body. A lot of failure in the piles has been reported because of earthquake and liquefaction of soil layer while these piles had been designed based on creditable codes like 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 piles in layered liquefiable soils, using a numerical method in which Rayleigh-Ritz approach was employed to minimize total potential energy. Furthermore an expression has been introduced to calculate effective buckling length of pile in liquefiable soils. By mean of this methodology the buckling capacity of pile could be obtained while the stiffness of pile and soil are given. This methodology can also be applied to extended pile shafts in bridge.

Keywords: pile, buckling, total potential energy, liquefiable soil, effective length

1. مقدمه

کاربرد شمع در سازه‌ها، دارای طیف بسیار گسترده‌ای است که از موارد استفاده آنها می‌توان به پی پل‌ها، پی ساختمان‌های بلند ساخته شده در در زمین‌های سست، پی اسکله‌ها و ... اشاره کرد [1]. پی‌های شمعی برای انتقال بار از خاک‌های سست به لایه‌های مقاوم در اعماق بیشتر به کار می‌روند. بخشی از این انتقال بار بوسیله مقاومت اصطکاکی در طول شمع و بخشی دیگر بوسیله مقاومت نوک

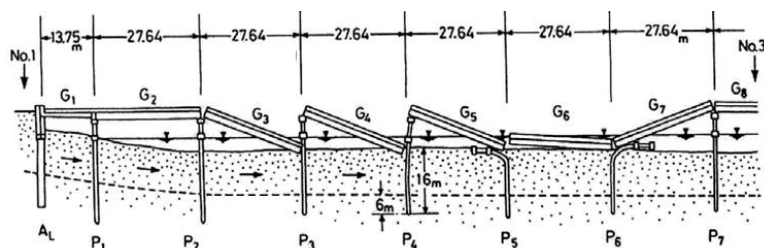
¹ Rayleigh-Ritz

شمع انجام می‌شود (شمع‌های اتکایی). با توجه به کاربرد گسترده شمع‌ها در سازه‌های مختلف، بررسی آن تحت بارهای جانبی مانند زلزله اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. خرابی‌های ایجاد شده در شمع‌ها در اثر زلزله به نوعی معرف کاستی‌هایی است که در طراحی و یا ساخت آن‌ها وجود داشته است. بررسی خرابی‌ها و انجام مطالعات پس از وقوع زلزله همواره منجر به پیشرفت در تحلیل و طراحی و توسعه ضوابط مناسب‌تر در اجرا شده است. این پیشرفت‌ها و تغییرات در آیین‌نامه‌ها به طور گام به گام پس از هر زلزله صورت گرفته است که به عنوان مثال می‌توان به تغییرات ایجاد شده در آیین‌نامه JRA^2 [2] بعد از زلزله کوبه اشاره نمود [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 مستعد ناپایداری محوری قرار گیرد. این ناپایداری می‌تواند باعث کماتش جانبی شمع در جهت ضعیف‌تر و ایجاد مفصل پلاستیک شود. با توجه به اینکه کماتش شمع به صورت ناگهانی و بدون نشانه خطر از قبل مشخص رخ می‌دهد لذا بررسی پایداری شمع در اثر کماتش و محاسبه ظرفیت کماتشی شمع امری ضروری می‌باشد [4]. در سالیان اخیر روش‌های مختلف آزمایشگاهی و عددی برای بررسی رفتار کماتشی شمع، مورد استفاده قرار گرفته است. بهاتاچاریا و بولتون [3] و [5] به بررسی خرابی شمع‌ها در خاک‌های روانگرا پرداخته و تناقض بین یافته‌های دیگر محققین در خرابی شمع‌ها را با وضعیت و نحوه خرابی واقعی آن‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. به عنوان مثال یکی از موارد مورد بررسی نحوه خرابی شمع‌های پل شووا در اثر زلزله 1964 نیگاتا بوده است. محققین زیادی علت خرابی این پل را گسترش جانبی ذکر کرده‌اند مانند هامادا در سال 1992 [6] و ایشی‌هارا در سال 1993 [7]. وضعیت این پل پس از خرابی در شکل 1 و شکل شماتیک خرابی آن در شکل 2 مشاهده می‌شود.



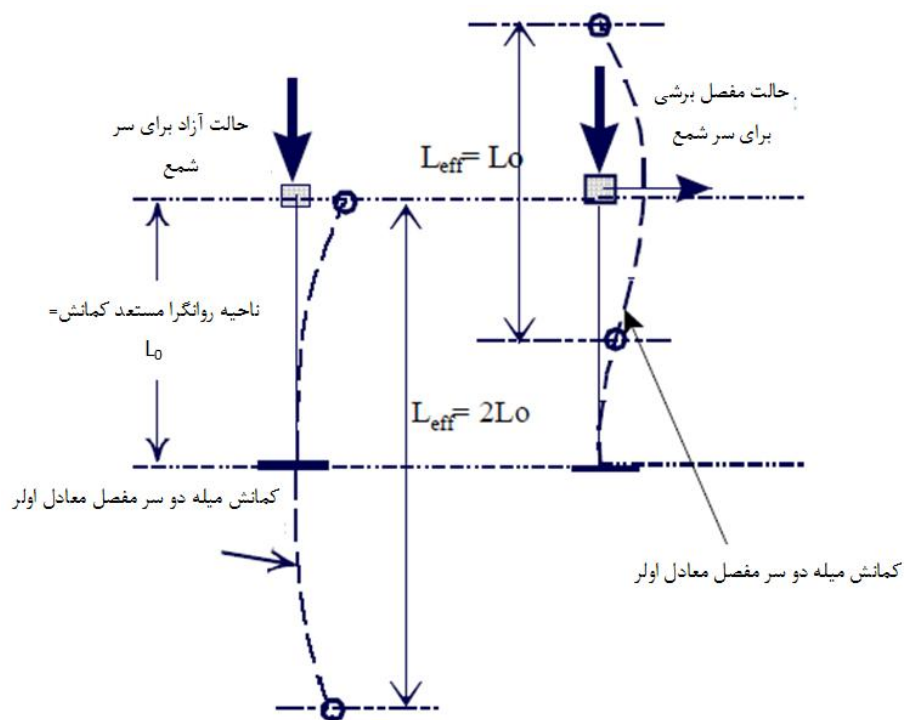
شکل 1- خرابی پل شووا در زلزله نیگاتا [3]



شکل 2- شکل شماتیک انحراف تیرهای پل شووا [3]

² Japanese Road Association

بهاتاچارایا و بولتون در تحقیقات خود به این نکته تمرکز کرده‌اند که شمع شماره $P5$ در جهت چپ تغییر شکل داده و شمع شماره $P6$ در جهت راست. اگر علت خرابی شمع‌ها گسترش جانبی بوده باشد، شمع‌ها باید در جهت شیب تغییر شکل می‌دادند. علاوه بر این در شمع‌های نزدیک ساحل رودخانه خرابی مشاهده نشده است 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. لذا بر اساس نکاتی که ذکر شد این دو محقق علت خرابی شمع‌های پل شووا را کماتش معرفی کرده‌اند. بهاتاچارایا همچنین با بررسی خرابی شمع‌های مختلف عبور کننده از لایه‌های خاک با پتانسیل روانگرایی و نیز انجام آزمایشات مختلف، حد لاغری 50 را برای عدم رخداد کماتش شمع پیشنهاد داده است [3 و 5]. بهاتاچارایا و همکاران در تحقیقات خود 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 مقادیر بر اساس تئوری پایداری ستون‌ها و مطابق شکل 3 در نظر گرفته شده‌اند [8].



شکل 3- میزان طول مؤثر شمع برای شرایط مرزی مختلف [8]

کومار و همکاران با در نظر گرفتن انواع مختلف خاک و ابعاد مختلف برای شمع با اعمال بار خروج از مرکز به بررسی رفتار کماتشی شمع در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. شرایط تکیه گاهی 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 [9]. شانکر و همکاران در سال 2007 بوسیله یک روش شبه اجزا محدود به مدل‌سازی شمع در خاک‌های روانگرا پرداخته‌اند و عمق لایه روانگرا، سختی سازه شمع، لاغری شمع و شرایط تکیه‌گاهی را پارامترهای مؤثر در کماتش شمع معرفی کرده‌اند [10].

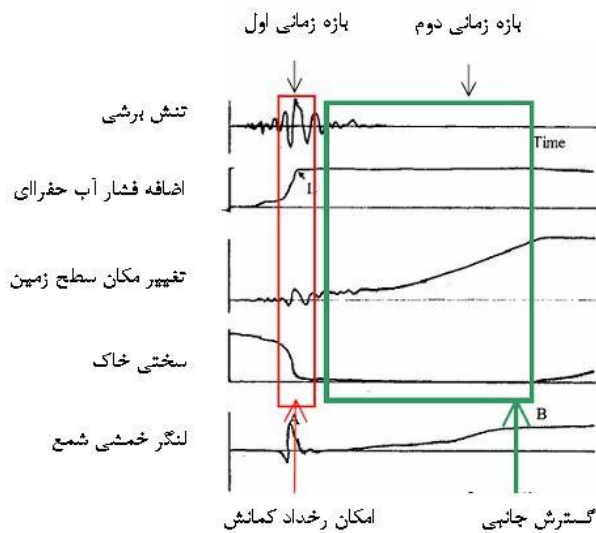
برای مدل‌سازی عددی کماتش شمع روش‌های مختلفی استفاده شده است. از آن جمله می‌توان به استفاده از مدل وینکلر برای مدل‌سازی اندرکنش شمع و خاک در خاک‌های روانگرا [11] و کمینه کردن انرژی پتانسیل کل و محاسبه بار کماتشی شمع در خاک تک لایه [4] اشاره کرد. تحقیقات صورت گرفته در خصوص بررسی ظرفیت کماتشی شمعها در خاکهای چند لایه بسیار محدود بوده

و عموماً با ساده سازی های بسیاری همراه بوده است [10]. هدف از این تحقیق ارائه روشی ساده و کاربردی جهت محاسبه طول موثر 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 موثر منظور می شود.

2. مکانیسم روانگرایی و اثرات 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 فونداسیون شمعی در خاک های روانگرا، مسائل و مشکلات بسیار پیچیده ای را در آنالیز و طراحی بوجود می آورد. در خاک های با پتانسیل روانگرایی، حتی قبل از آنکه خاک در حالت روانگرایی کامل و سختی خاک در حالت مینیمم قرار گیرد، فونداسیون شمعی ممکن است در معرض تکان های قابل توجهی قرار گیرد. در طول زمان تکان خوردن، شمع مستعد هر گونه آسیب (شامل گسترش ترک ها، ایجاد مفصل و نهایتاً 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 وقوع زلزله که در اثر حرکت توده خاک در زمین های شیب دار (گسترش جانبی³) می باشد. همان طور که در شکل 4 مشاهده می شود حتی در زمین های شیب دار قبل از وقوع گسترش جانبی، ممکن است در یک لحظه، اتکا 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 قابل توجه تغییر مکان سر شمع نسبت به حالت غیر روانگرا می شود. اگر پس از روانگرایی، مقاومت باقی مانده خاک از تنش های برشی استاتیکی بوجود آمده در اثر شیب یا یک سطح آزاد مثل ساحل رودخانه کمتر باشد، گسترش جانبی قابل توجه یا جابجایی شیب، ممکن است اتفاق بیفتد. در حین گسترش جانبی، توده خاک می تواند فشارهای ویران کننده ای را روی شمع ها اعمال کند که منجر به خرابی کامل آنها شود [12]. در طول زمین لرزه های 1964 نیگاتا، 1964 آلاسکا و 1995 کوبه، خرابی های بسیاری در سازه های متکی به شمع مخصوصاً پل ها رخ داده است به طوری که در زلزله 1964 آلاسکا بیش از 250 پل در اثر روانگرایی و حرکت جانبی زمین آسیب دیده اند [13].

³ Lateral spreading



شکل 4- تاریخچه زمانی پارامترهای مختلف بر اساس تحقیقات یاسودا و بریل [3]

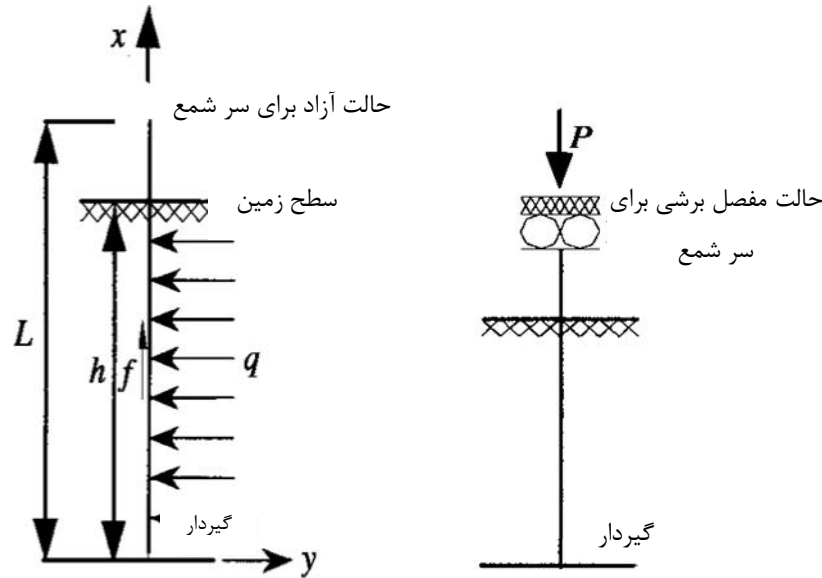
3. رفتار کمانشی شمع در خاک تک لایه

گبر و همکاران [4] برای بررسی رفتار کمانشی شمعها در خاک تک لایه، توزیع ضریب عکس‌العمل افقی بستر خاک در عمق را بر مبنای مطالعات ترزاقی در سال 1955 به صورت زیر در نظر گرفتند:

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

که در آن k_h برابر ضریب افقی عکس‌العمل 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 تساوی 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.

برای محاسبه ظرفیت کمانشی شمع از کمینه کردن انرژی پتانسیل کل با در نظر گرفتن تغییر شکل مناسب برای شمع به روش ریلی-ریتز می‌توان استفاده نمود. برای کنترل 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 5 مشاهده می‌شود که محتمل‌تر از سایر ترکیبات می‌باشند.



شکل 5- شرایط مختلف تکیه گاهی برای شمع [4]

تنش وارده از طرف خاک به شمع بر اساس روش عکس العمل بستر به صورت زیر محاسبه می شود:

$$p = m_h (h - x)^\omega \xi^{1-\omega} y \quad (2)$$

که در آن h طولی از شمع است که در خاک قرار گرفته، x فاصله از ته شمع و y تغییر مکان جانبی شمع است. پس عکس العمل خاک که در واحد طول به شمع وارد می شود برابر است با مقدار تنش محاسبه شده در رابطه (2) ضرب در قطر شمع d :

$$q(x) = pd = m_h d (h - x)^\omega \xi^{1-\omega} y \quad kN / m \quad (3)$$

در رابطه (3) تغییرات q نسبت به y خطی فرض شده است.

معادلات تغییر شکل شمع با در نظر گرفتن انواع مختلف شرایط مرزی بر اساس روش ریلی-ریتز در جدول 1 ارائه شده است. این معادلات شرایط تکیه گاهی را برای دو حالت فوق الذکر ارضا می کنند. میزان n در معادلات تغییر شکل، تعداد جملات نیم موج توابع تغییر شکل است. انرژی کرنشی سیستم شمع-خاک در اثر خمش شمع و تغییر شکل الاستیک خاک (U) و انرژی پتانسیل بارهای خارجی (V) به صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$U + V = \frac{EI}{2} \int_0^L (y'')^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^h q(x)y dx - \frac{1}{2} \int_0^L P(x)(y')^2 dx \quad (4)$$

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

با توجه به خطی بودن تغییرات اصطکاک جداره شمع نسبت به عمق، میزان $P(x)$ از رابطه زیر بدست می آید:

$$P(x) = P \left[1 - \psi \frac{(h-x)^2}{h^2} \right] \quad (x \leq h); \quad P(x) = P \quad (x > h) \quad (5)$$

که P نیروی محوری وارده به سر شمع، ψ پارامتر تأثیر اصطکاک جداره شمع روی نیروی محوری شمع است با تغییراتی بین صفر تا یک.

جدول 1- توابع تغییر شکل مربوط به شرایط مرزی متفاوت [4]

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

با جایگذاری روابط (3) و (5) در معادله (4) داریم:

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

برای برقراری تعادل در سیستم، انرژی 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 توابع شکل هستند و با توجه به اینکه δC_i ها مقادیر اختیاری تغییرات تغییر مکان هستند، معادله (7) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

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

با قرار دادن معادله (6) در (8) داریم:

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

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

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

معادله (9) دارای جواب غیر صفر است در صورتی که درمیان ماتریس ضرایب آن صفر باشد. که برای بدست آوردن ماتریس ضرایب معادله (9) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

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

که در آن A همان ماتریس ضرایب است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

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

که در رابطه (12) هر یک از ماتریس‌های AI 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:

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

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

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

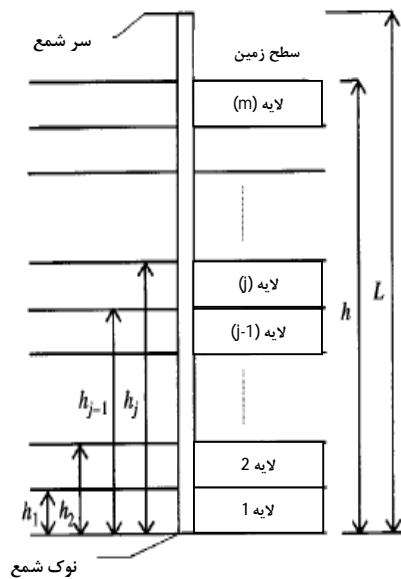
$$[A4]_{ij} = \int_0^h (h-x)^2 a_i'(x) a_j'(x) dx \quad (16)$$

که در روابط فوق $a_i(x)$ جمله i ام از توابع شکل ارائه شده در جدول 1 است.

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

4. رفتار کمانشی شمع در خاک‌های لایه‌ای

روابط ارائه شده برای بررسی کمانش شمع در بخش قبل برای یک خاک یک لایه بوده است. با توجه به اینکه در بیشتر مواقع شمع از لایه‌های مختلف خاک با مشخصات متفاوت عبور می‌کند، توسعه روابط ارائه شده توسط گبر برای خاک چند لایه ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور در این تحقیق این روابط برای یک خاک چند لایه توسعه داده شده است و از آن برای مدل‌سازی رفتار کمانشی شمع‌های عبورکننده از خاک‌های روانگرا و توسعه روابطی برای تعیین طول موثر شمع استفاده شده است. شکل شماتیک خاک چند لایه در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 6- لایه‌بندی خاک

در این حالت در دو رابطه نسبت به حالت تک لایه‌ای تغییر ایجاد می‌شود. اول در رابطه (1) برای محاسبه توزیع عکس‌العمل جانبی در طول شمع، k_h و دوم در رابطه (5) برای محاسبه توزیع نیروی محوری در شمع، $P(x)$ برای محاسبه k_h و $P(x)$ در خاک چند لایه یک مقدار k_{h0} و P_0 به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود و با اعمال یک ضریب در هر لایه میزان آن پارامتر در آن لایه بدست می‌آید. یعنی:

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

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

که در روابط بالا r_p و r_q آرایه‌هایی هم بعد با تعداد لایه‌های خاک هستند که به ترتیب تغییرات نیروی محوری و ضریب عکس‌العمل جانبی را در لایه‌های مختلف مشخص می‌کنند و P_j و k_{hj} به ترتیب مقادیر نیروی محوری و ضریب عکس‌العمل جانبی هستند که P_j در رابطه (4) به جای $P(x)$ و k_{hj} در روابط (2)، (3) و (4) قرار می‌گیرد.

با قرار دادن رابطه تغییر یافته (4) در معادله (8) و انجام انتگرال‌گیری و تفکیک، معادله (12) به شکل زیر در می‌آید:

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

که درایه‌های ماتریس‌های $A1$ تا $A4$ از روابط زیر بدست می‌آیند:

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

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

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

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

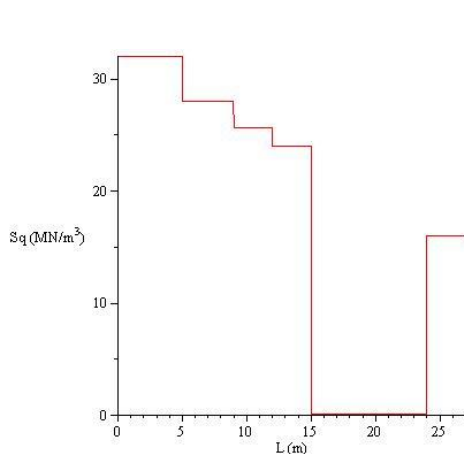
در روابط بالا مقادیر $S_p(x)$ و $S_q(x)$ به توزیع k_h و P ارتباط دارند و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

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

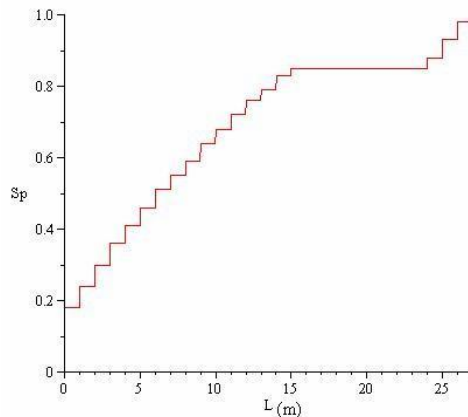
$$S_q(x) = \sum_{j=1}^m r_q(j) (u(x - h_{j-1}) - u(x - h_j)) \quad (25)$$

که در آن m تعداد لایه‌ها؛ h_j فاصله بالای لایه j ام از کف شمع و u تابع پله‌ای است.

توابع فوق به صورت پله‌ای مقادیر P و k_h را در طول شمع توزیع می‌کنند که به ترتیب در شکل 7 و شکل 8 نمونه‌ای از آنها مشاهده می‌شود.



شکل 8- نمونه‌ای از تابع پله‌ای جهت توزیع k_h در طول شمع



شکل 7- نمونه‌ای از تابع پله‌ای جهت توزیع نیروی محوری در طول شمع

5. ضریب عکس‌العمل بستر در خاک روانگرا

یکی از روش‌های در نظر گرفتن ضریب عکس‌العمل بستر در خاک‌های مختلف، بیان رابطه آن با عدد SPT است که توسط انجمن معماری ژاپن (AIJ^4) برای خاک‌های روانگرا به صورت زیر پیشنهاد شده است:

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

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

که در آن E_0 مدول تغییر شکل برحسب N عدد SPT و D قطر شمع بر حسب سانتیمتر است [14].

هنگامی که خاک روانگرا می‌شود سختی خاک کاهش می‌یابد و بر اساس تحقیقات مختلف، این کاهش بوسیله یک ضریب کاهش بیان می‌شود. ایشی‌هارا در سال 1997 این ضریب را بین 0/001 تا 0/01 متغیر تعریف کرد. توکی‌ماتسو در سال 1997 رابطه زیر را بر اساس افزایش تغییر مکان ارائه داد [14]:

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

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 تعیین ضریب عکس‌العمل بستر در خاک روانگرا پیشنهاد می‌دهد [15]:

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

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

⁴ Architectural Institute of Japan

همان‌طور که دیده می‌شود سختی خاک پس از روانگرایی کامل بسیار ناچیز بوده و با توجه وابستگی آن به پارامترهای مختلف می‌توان در روابط طراحی، برای محاسبه بار کمانشی به صورت محافظه کارانه از آن صرف‌نظر نمود. لذا در این تحقیق جهت تعیین بار کمانشی لایه روانگرا بدون سختی منظور می‌شود.

6. بررسی طول لازم برای گیرداری شمع

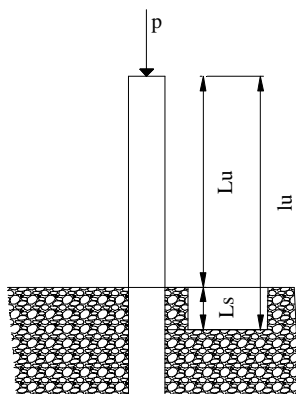
همان‌طور که در شکل 9 دیده می‌شود در بسیاری از موارد بخشی از شمع در ناحیه فوقانی به صورت مهار نشده قرار دارد. همچنین در مواردی که شمع از یک لایه خاک با پتانسیل روانگرایی عبور می‌کند، در این ناحیه با توجه به عدم وجود مهار جانبی، قابلیت کمانش دارد. طول این لایه معرف طول مهار نشده شمع می‌باشد. شرایط مرزی انتهای شمع وابسته به میزان قرارگیری شمع در خاک غیر روانگرا است (شکل 9). مطابق آیین‌نامه ACI543R-00 طول ناحیه عبور کننده از لایه غیر روانگرا (L_s) برای تامین گیرداری از رابطه زیر بدست می‌آید [16]:

$$L_s = 1.8 \times \sqrt[3]{\frac{EI}{k_h}} \quad (30)$$

که در آن EI سختی خمشی شمع و k_h ضریب افقی عکس‌العمل بستر است. با توجه به رابطه (30) طول آزاد جهت محاسبه بار کمانشی از رابطه زیر بدست می‌آید:

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

که l_u طول آزاد جهت محاسبه بار کمانشی و L_u طول مهار نشده شمع است.



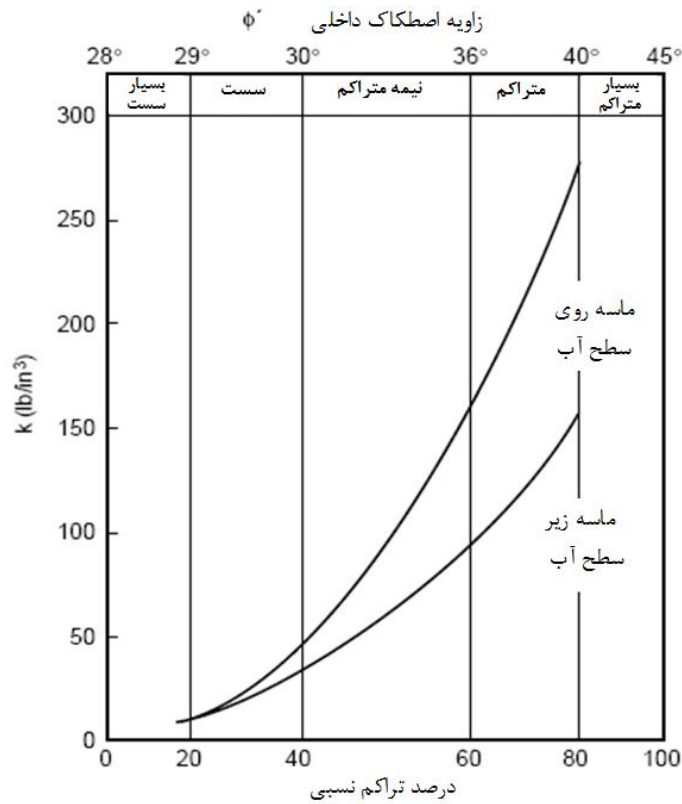
شکل 9- شماتیک طول آزاد و طول لازم برای گیرداری برای شمع

مقدار k_h را می‌توان بر اساس پیشنهاد $API-RP2A-WSD^5$ [17] از نمودار شکل 10 و یا به توصیه $ACI543R-00$ بر اساس جدول 1 تعیین کرد. $ACI543R-00$ مقادیر داده شده در جدول 2 را محافظه کارانه می‌داند [16].

⁵ American Petroleum Institute- Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design

جدول 2- توصیه ACI برای k_{fi} در خاک‌های مختلف [16]

| نوع خاک | k_{fi} , lb/in ³ | k_{fi} , kN/m ³ |
|-------------|-------------------------------|------------------------------|
| ماسه سست | 1/5 | 407 |
| ماسه متوسط | 10 | 2710 |
| ماسه متراکم | 30 | 8140 |
| سیلت | 0/4-3 | 109-814 |
| خاک نباتی | 0/2 | 54 |
| رس | $67S_{ii}$ | |



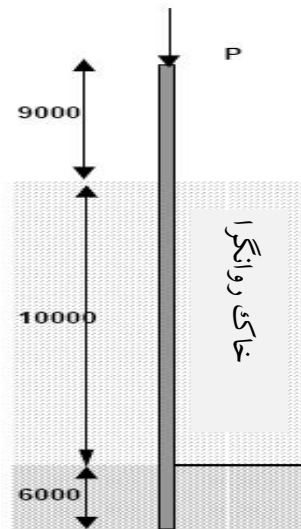
شکل 10- نمودار محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر [17]

برای کنترل این رابطه با استفاده از برنامه نوشته شده در خاک‌های لایه‌ای از شمع پل شووا استفاده شده است. مشخصات این شمع در جدول 3 آمده است:

جدول 3- مشخصات شمع بکار رفته در پل شووا

| | |
|--------------------------------|-----------|
| طول (m) | 25 |
| نوع شمع | فولادی |
| قطر خارجی (m) | 0/609 |
| قطر داخلی (m) | 0/591 |
| مدول الاستیسیته (GPa) | 210 |
| K_h بر اساس API (MN/m^3) | 24 |
| I (m^4) | $7/63E-4$ |
| L_s (m) | 2/63 |

لایه بندی خاک نیز در شکل 11 آمده است.

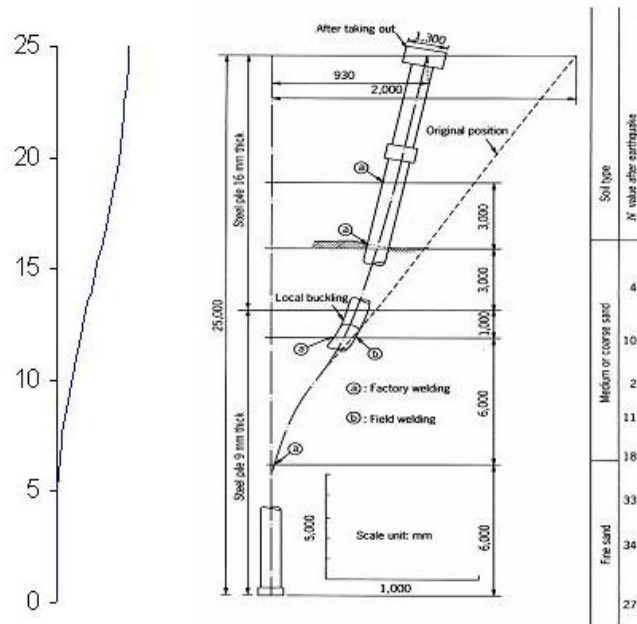


شکل 11- مشخصات لایه‌های خاک در پل شووا [3]

پس از مدل‌سازی شمع به صورت انتهای گیردار و سر *Fixed-Sway* و نتایج زیر بدست آمد:

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

همانطور که مشاهده می‌شود طول L_s بدست آمده از طریق برنامه در حدود $\frac{2.43}{2.63} = 0.92$ طول پیشنهادی *ACI* است که به نظر می‌رسد رابطه *ACI* محافظه‌کارانه است. لازم به ذکر است در محاسبه فوق سختی خاک روانگرا به صورت محافظه‌کارانه برابر صفر فرض شده است. در شکل 12 مود اول کمانش شمع بدست آمده از برنامه و مود خرابی مشاهده شده در محل نشان داده شده است.



شکل 12- مود اول کمانش شمع و مود خرابی شمع

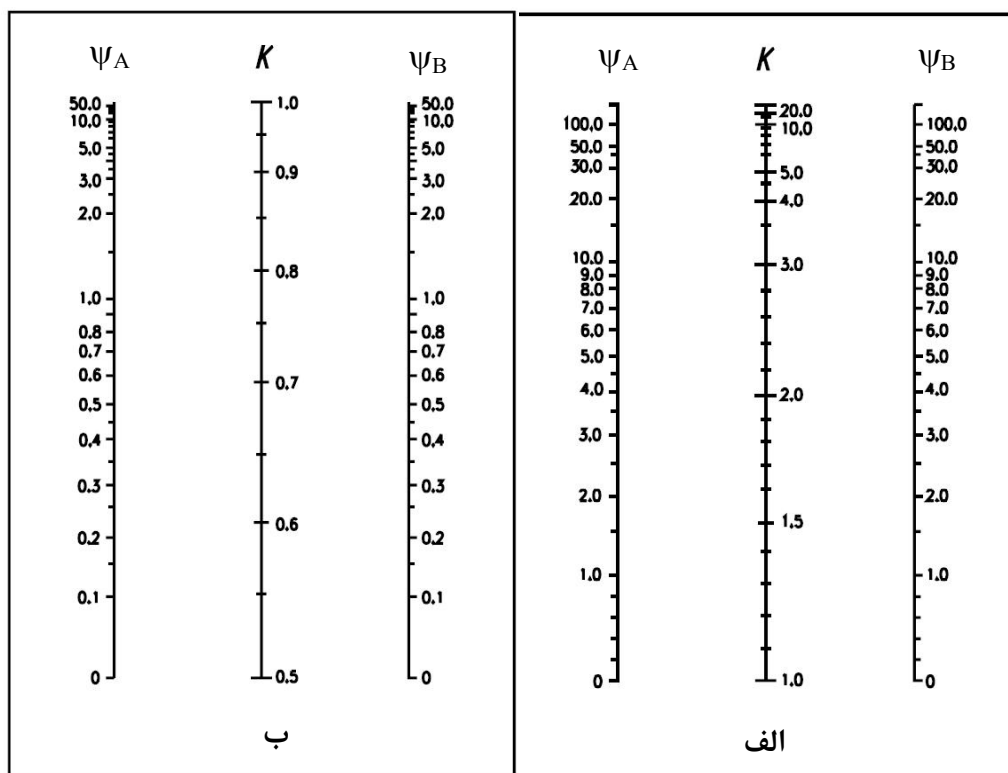
7. روش پیشنهادی برای برآورد طول مؤثر شمع در خاک با لایه روانگرایی سطحی

تا کنون برای محاسبه طول مؤثر شمع تحقیقات بسیار محدودی صورت گرفته است. کما اینکه روابط آیین‌نامه‌ای هم برای محاسبه این طول وجود ندارد. لذا در این تحقیق سعی شده روابطی که برای محاسبه طول مؤثر ستون در قاب‌ها وجود دارد توسعه داده شود تا با استفاده از این روابط طول مؤثر شمع بدست آید.

ضریب طول مؤثر یک ستون در قاب تابعی از نسبت سختی ستون و تیرهای متصل به آن است. این نسبت با ψ مشخص می‌شود و از رابطه زیر بدست 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 المان‌های متصل به گره بر اساس روش توزیع لنگر و شیب افت برابر $4EI / L$ که ضریب 4 در رابطه (32) از صورت و مخرج ساده شده است. با محاسبه این نسبت در دو انتهای ستون میزان ضریب طول مؤثر با استفاده از نمودارهای شکل 13 بدست می‌آید [18].



شکل 13- نمودگراف مربوط به محاسبه ضریب طول مؤثر

(الف) ستون بدون حرکت جانبی (ب) ستون با حرکت جانبی [18]

با توجه به اینکه در شمع‌ها، خاک نقش اتکای جانبی را ایفا می‌کند باید رابطه (32) به شکلی اصلاح شود که به جای سختی تیرها، سختی لایه‌ای از خاک در دو انتهای بخش روانگرا در نظر گرفته شود. بنابراین رابطه (32) به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

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

که در آن:

EI سختی خمشی شمع است که برای شمع‌های بتنی، $ACI-318-05$ رابطه زیر را ارائه می‌دهد [19]:

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

در این رابطه E_c مدول الاستیسیته بتن، I_g ممان اینرسی مقطع ترک نخورده و β_d ضریبی است برای منظور کردن اثرات خزش بر بتن و فولاد تحت بارهای دائمی که ACI مقدار $0/6$ را برای حالتی که بار جانبی دائمی وجود دارد و مقدار صفر را برای بار جانبی غیر دائمی پیشنهاد می‌کند.

همچنین در رابطه (33) L_u طول آزاد شمع و یا طول مهار نشده شمع در لایه روانگرا است.

I_s ممان اینرسی خاک غیر روانگرا است که از تغییر شکل شمع جلوگیری می‌کند و همانند تیر متصل به شمع عمل می‌کند. لذا منطقی است که حداکثر ضخامتی از خاک که برای گیرداری شمع لازم است برای محاسبه ممان اینرسی خاک مورد استفاده قرار گیرد که این موضوع بر اساس مطالعات پارامتریک انجام شده در این تحقیق به تأیید رسیده است لذا 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 مینیمم L_s و ضخامت لایه غیرروانگراست.

1.7. محاسبه ضریب γ

همانطور که بیان شد ضریب سختی دورانی (γ) در حالتی که اتصال دو سر المان صلب است برابر 4 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 داریم:

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

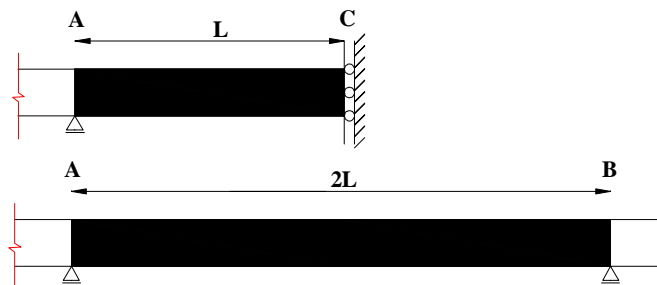
$$M_r = \frac{2EI}{L} \left(2\theta_r + \theta_f - \frac{3\delta}{L} \right) \pm FEM_{rf} \quad (37)$$

که در آن اندیس‌های f و r به ترتیب معرف 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 ابتدا با توجه اصل تقارن در قاب‌ها، مطابق شکل 14، المان مورد نظر به صورت دو برابر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین معادله شیب افت بین دو نقطه A و B به صورت زیر بدست می‌آید:



شکل 14- شماتیک المان 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) داریم:

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

با جایگذاری رابطه (40) در رابطه (39) و ساده‌سازی داریم:

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

با توجه به موارد ذکر شده در بالا، می‌توان با محاسبه ψ در دو انتهای شمع از رابطه (33)، مقدار ضریب طول مؤثر را از نمودار شکل 13 و بوسیله آن به راحتی نیروی کمانشی شمع مانند ستون بدست آورد.

2.7. صحت سنجی روش پیشنهادی

برای بررسی این موضوع یک شمع بتنی به طول 26 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 پتانسیل 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 فرض شده است. در هر مدل با استفاده از برنامه تهیه شده، مقدار P_{cr} محاسبه شد و از روی آن مقدار طول مؤثر با استفاده از رابطه زیر بدست آمد:

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

میزان ضریب طول مؤثر برابر نسبت طول مؤثر به طول آزاد است که به صورت تحلیلی بدست می‌آید (λ). همچنین مقدار ψ در پایین شمع با استفاده از رابطه (33) بدست آمد و مقادیر 100 و صفر به ترتیب برای حالت آزاد و مفصل برشی به عنوان ψ در بالا در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از نمودار شکل 13، و در اختیار داشتن ψ در دو انتهای شمع مقادیر ضریب طول مؤثر با استفاده از نمودار (K_{AB}) نیز محاسبه شد. با مقایسه مقادیر λ و K_{AB} مشاهده شد که همخوانی قابل توجهی بین دو روش وجود دارد. تعدادی از نتایج حاصله در جدول 4 مربوط به حالت آزاد و جدول 5 مربوط به حالت مفصل برشی آمده است.

جدول 4- نتایج مربوط به حالت آزاد برای سرشمع

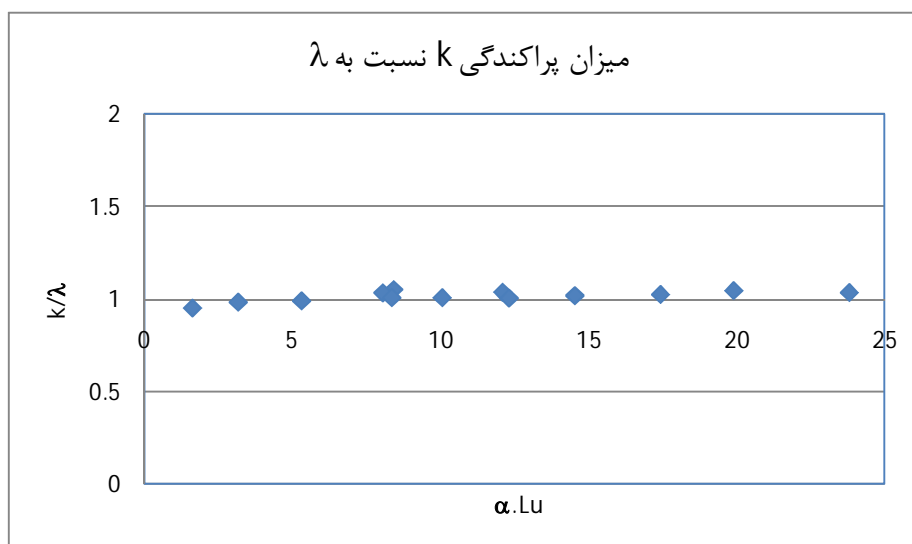
| شماره نمونه | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| قطر شمع (m) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.6 | 1 |
| $kh(kN/m^3)$ | 20000 | 24000 | 32000 | 16000 | 16000 | 24000 | 24000 |
| $EI(kN.m^2)$ | 29263.31 | 29263.31 | 29263.31 | 29263.31 | 3792.53 | 60680.40 | 468212.98 |
| $P_{cr}(KN)$ | 615.35 | 262.68 | 388.56 | 602.05 | 88.30 | 761.39 | 3576.00 |
| $L_u(m)$ | 9 | 15 | 12 | 9 | 9 | 12 | 15 |
| $Le(m)$ | 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 |
| $3EI/L_u(kN.m)$ | 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 5- نتایج مربوط به حالت مفصل برشی برای سرشمع

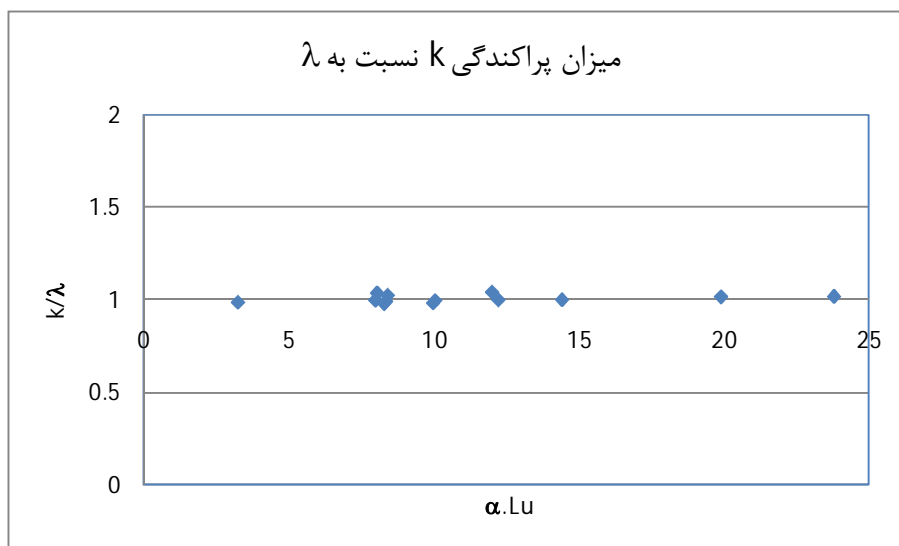
| شماره نمونه | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|-----------|
| قطر شمع (m) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.6 | 1 |
| $kh(kN/m^3)$ | 20000 | 24000 | 32000 | 16000 | 16000 | 24000 | 24000 |
| $EI(kN.m^2)$ | 29263.31 | 29263.31 | 29263.31 | 29263.31 | 3792.53 | 60680.40 | 468212.98 |
| $Pcr(KN)$ | 2458.85 | 1054.29 | 1585.65 | 2494.49 | 375.92 | 3076.71 | 14306.97 |
| $L_u(m)$ | 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 |
| $L_s(m)$ | 1.94 | 1.87 | 1.77 | 2.03 | 1.35 | 2.17 | 3.26 |
| $I_s(m^4)$ | 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 |
| $I_s \times Kh(kN.m)$ | 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 |

در جداول فوق سطرهای اول تا سوم ورودی برنامه، سطرهای چهارم تا ششم خروجی برنامه است. یعنی λ ضریب طول مؤثر بدست آمده از برنامه است. همچنین سطرهای هفتم تا دوازدهم مراحل محاسبه k_{AB} یا همان ضریب طول مؤثر با استفاده از نمودار است. با مقایسه مقادیر مختلف λ و k_{AB} و محاسبه میزان اختلاف به این نتیجه می‌رسیم که برای کنترل کماتش شمع به راحتی می‌توان از نمودارهای مربوط به ستون استفاده نمود.

برای مقایسه بهتر نتایج میزان پراکندگی λ و k_{AB} بر حسب یک پارامتر بدون بعد محاسبه شده است. این پارامتر بدون بعد به صورت $\alpha \times L_u$ در نظر گرفته شده است که در آن α از رابطه (10) بدست می‌آید که واحد آن m^{-1} است. نتایج برای حالت آزاد در شکل 15 و برای حالت مفصل برشی در شکل 16 مشاهده می‌شود.



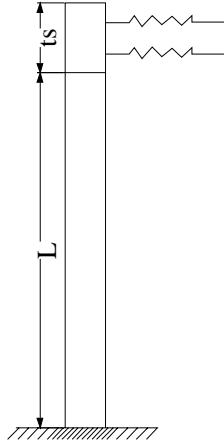
شکل 15- میزان پراکندگی k نسبت به λ در حالت آزاد برای سر شمع



شکل 16- میزان پراکندگی k نسبت به λ در حالت مفصل برشی برای سر شمع

8. روش پیشنهادی برای برآورد طول موثر شمع در خاک با لایه روانگرای غیر سطحی

در بسیاری موارد لایه روانگرا مابین دو لایه غیر روانگرا قرار گرفته و شمع با عبور از لایه روانگرا بر لایه زیرین متکی می‌شود در این حالت خاک لایه فوقانی بسته به ضخامت و سختی آن شرایط مرزی متفاوتی را برای شمع ایجاد می‌نماید که در تعیین طول کمانشی آن باید مورد توجه قرار گیرد. در این حالت لایه فوقانی خاک مانع تغییر شکل جانبی خاک می‌شود و اگر میزان سختی و ضخامت آن زیاد باشد در مقابل دوران سر شمع نیز مقاومت می‌کند (حالت نیمه گیردار). بنابراین در این حالت نمی‌توان مانند حالت‌های قبلی از نمودار استفاده کرد زیرا وجود و یا عدم وجود تغییر مکان جانبی که به سختی و ضخامت لایه فوقانی بستگی دارد مشخص نیست. لذا برای تحلیل این حالت لایه خاک فوقانی به صورت دو فنر با سختی معادل $\frac{K}{2} = \frac{k_h \times d \times t_s}{2}$ و در 0/25 و 0/75 لایه فوقانی در نظر گرفته شد تا علاوه بر مقاومت در برابر تغییر مکان، مقاومت خاک در برابر دوران شمع نیز لحاظ شود. سپس معادله دیفرانسیل زیر برای نسبت‌های مختلف $\frac{KL^3}{EI}$ به صورت عددی حل شد. مقادیر مختلف طول مؤثر بدست آمد. معادله دیفرانسیل فوق بر اساس شکل 17 به شرح زیر است.



شکل 17- چگونگی مدل خاک فوقانی با دو فنر

معادله لنگر خمشی شمع فوق به صورت زیر است:

$$M = p(\delta - y) - \frac{K}{2}\delta_1\left(x - \frac{t_s}{4}\right) - \frac{K}{2}\delta_2\left(x - \frac{3t_s}{4}\right) \quad (43)$$

که در آن x فاصله از سر شمع، M لنگر در فاصله x ، 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 (43) بر EI و جایگذاری y'' به جای $\frac{M}{EI}$ داریم:

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

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

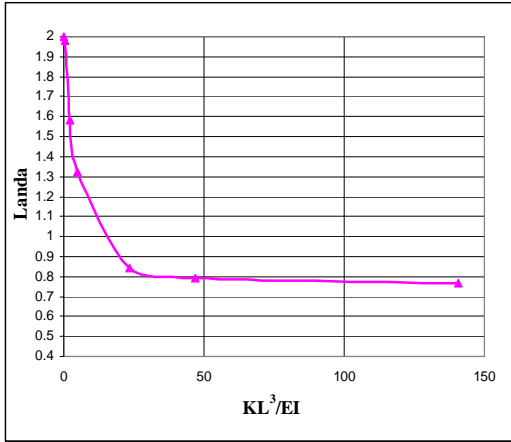
شرایط مرزی معادله دیفرانسیل فوق به شرح زیر است:

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

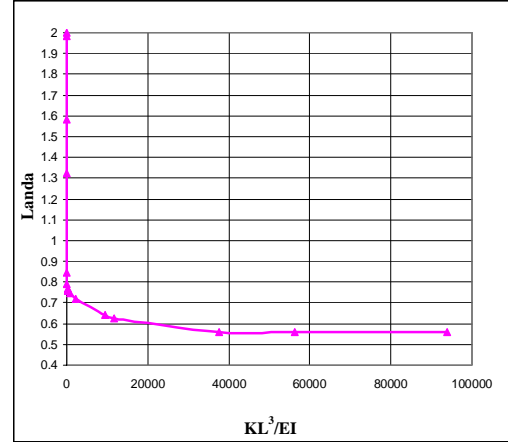
$$y(L + t_s) = 0 \quad \text{and} \quad y'(L + t_s) = 0 \quad (45)$$

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

با حل معادله فوق به صورت عددی مقادیر مختلف ضریب طول مؤثر به ازاء مقادیر مختلف $\frac{KL^3}{EI}$ بدست می آید. مقادیر ضریب طول مؤثر به ازای سختی و ضخامت زیاد لایه فوقانی به سمت 0/5 میل می کند. در شکل 18 پاسخ این معادله مشاهده می شود. همچنین در شکل 19 بزرگنمایی این پاسخ در مقادیر ابتدایی $\frac{KL^3}{EI}$ مشاهده می شود.



شکل 19- بزرگنمایی پاسخ معادله دیفرانسیل در مقادیر ابتدایی $\frac{KL^3}{EI}$



شکل 18- نمودار پاسخ معادله دیفرانسیل

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 اعمالی کوچکتر از یک است که این نسبت را β_p می‌نامیم. با توجه به این موضوع به راحتی می‌توان نتیجه گرفت نیروی کمانشی بدست آمده از روش تحلیلی β_p برابر کوچکتر از نیروی محاسبه شده از روی نمودار است.

حال مانند حالت قبل یک شمع به طول 26 متر با مقاطع مختلف در نظر گرفته شده و تأثیر لایه فوقانی بر بار کمانشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل و نمودار فوق در جدول 6 آمده است. در این جدول برای راحتی کار تنها مقایسه نیروهای کمانشی انجام گرفته است. همچنین ضریب β_p از قبل اعمال 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. لذا می‌توان از این روش برای محاسبه نیروی کمانشی شمع استفاده نمود.

جدول 6-مقایسه نتایج حاصل از تحلیل با نتایج 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 |
| $k_{hu} (kN/m^3)$ | 24000 | 4000 | 16000 | 8000 | 8000 | 32000 | 3000 |
| $k_{hb} (kN/m^3)$ | 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 |

9. جمع بندی

در این تحقیق 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 شروع شود، می‌توان از روش اول و با استفاده از نمودار بر اساس میزان ψ محاسبه شده در انتهای پایینی، ضریب طول مؤثر محاسبه می‌شود و از روی آن نیروی کمانشی بدست 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 برای محاسبه ضریب طول مؤثر استفاده کرد، زیرا در این حالت با توجه به سختی و ضخامت لایه غیر روانگرایی فوقانی، 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 لذا دقیقاً نمی‌توان تعیین کرد که از کدام نمودار (با وجود تغییر مکان جانبی و یا بدون وجود آن) برای محاسبه ضریب طول مؤثر استفاده کرد. برای حل این مشکل با حل معادله دیفرانسیل کمانش با در نظر گرفتن دو فنر (برای کنترل تغییر مکان و دوران قسمت بالایی) در بالای شمع، بر اساس مقادیر مختلف نسبت سختی محوری فنر و سختی جانبی شمع، مقادیر مختلف برای ضریب طول مؤثر محاسبه شد که در نمودار شکل 18 آمده است. این مقادیر بین 2 برای حالت آزاد، تا 0/5 برای حالت گیردار کامل متغیر است و بر اساس آن می‌توان نیروی کمانشی شمع را محاسبه نمود.

برای محاسبه نیروی کمانشی شمع با در نظر گرفتن سختی خاک در لایه‌بندی دقیق‌تر نیز باید معادله دیفرانسیل کمانش حاصل از کمینه کردن انرژی پتانسیل کل در خاک‌های لایه‌ای حل شود که 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 نمود.

10. مراجع

- [1] Bhattacharya S., Dash S. R., Adhikari S., "On the mechanics of failure of pile-supported structures in liquefiable deposits during earthquakes," *Current Science*, vol. 94, no. 5, Mar. 2008.
- [2] JRA (1996,1980,1972): Japanese Road Association, *Specifications for highway bridge, Part V, Seismic Design*.
- [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*, vol. 2, no. 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] Meera R. S., Shanker K., Basudhar P. K., "Flexural response of piles under liquefied soil conditions," *Geotechnical and geological Engineering*, Springer, vol. 25, no. 3, pp. 409-422, 2007.
- [15] 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.
- [16] ACI 543R-00, Design, Manufacture, and Installation of Concrete Piles, Reported by ACI Committee 543, 2000.
- [17] American Petroleum Institute "API Recommend Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD)" Twenty-first Edition, December 2000.
- [18] مستوفی نژاد، داود؛ سازه‌های بتن آرمه (جلد اول)؛ انتشارات ارکان دانش؛ اصفهان؛ 1386.
- [19] ACI 318-05, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary-ACI 318R-05, American Concrete Institute, Farming Hills, MI, USA, 2005.