مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲-۳۲، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۱۳۱-۱۳۸، (یادداشت فنی)

Research Note

مقایسه‌ی آیین‌نامه‌های مختلف برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌ها

محمد مهدی احمدی* **(استاد)**
احسان کشمیری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر در ارائه‌ی روش‌های علمی در طراحی شمع‌ها، تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها به دلیل لزوم لحاظ‌کردن اندرکنش خاک و سازه در روش‌های علمی، همچنان به روابط تجربی وابسته است. آیین‌نامه‌های مختلف، روابط متفاوتی را برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری محوری شمع‌ها ارائه کرده‌اند. ولی هر یک از روش‌های مذکور با فرضیاتی تنظیم شده‌اند که ممکن است تمامی آن‌ها در شرایط کلی برقرار نباشد. در این نوشتار، فلسفه‌ی طراحی بر مبنای روش‌های قطعی و احتمالاتی و نیز مفهوم ضرایب اطمینان در آیین‌نامه‌های طراحی: ساختمان، راه، سازه‌ی دریایی، و پل مورد بحث قرار گرفته است. همچنین اصول طراحی شمع تحت بار محوری بر مبنای آیین‌نامه‌های API (انجمن نفت آمریکا)، Eurocode۷ (استاندارد اروپا) و آیین‌نامه‌ی کانادا بیان و در قالب یک مثال عددی، رویکردهای مختلف طراحی براساس آیین‌نامه‌های API و Eurocode۷ مقایسه شده‌اند.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری محوری شمع، آیین‌نامه‌ی طراحی شمع، روش LRFD.

mmahmadi@sharif.edu
eks_keshmiri@mehr.sharif.ir

۱. مقدمه

درگذشته برای طراحی پی‌ها، جهت جبران عدم قطعیت‌ها در شرایط خاک و مقدار بارها و همچنین ایجاد یک توازن بین هزینه و طراحی مطمئن، از ضرایب اطمینان استفاده می‌کرده‌اند،[۱] که به آن روش سنتی و مرسوم روش طراحی قطعی (یا تعیینی[۱]) می‌گویند. در روش مذکور، لازم است طراح ضرایب اطمینانی را انتخاب کند که می‌تواند منجر به طراحی دست بالای پی شود. به همین دلیل روش‌های طراحی بر مبنای احتمالات جایگزین روش‌های قطعی شده‌اند.[۱]

هدف اصلی روش‌های احتمالاتی، کمّی‌سازی احتمال یک پدیده است و هدف دیگر آنها، ارزیابی بهتر عوامل مختلف مؤثر در گسیختگی است.[۱] به‌طور کلی روش‌های احتمالاتی مهم عبارت‌اند از:

۱. روش اتفاقی[۲]

۲. روش مرتبه‌ی اول ممان دوم[۳]

۳. LRFD[۴]

۱.۱. روش LRFD

نام دیگر روش LRFD، مقاومت نهایی[۵] است. در روش مذکور، ضرایب γ به بارها اعمال می‌شود، که این ضرایب اغلب از ۱ بزرگ‌تر هستند (رابطه‌ی ۱):[۱]

$$P_u = P_1\gamma_1 + P_2\gamma_2 + \ldots \qquad (۱)$$

این ضرایب نشان‌دهنده‌ی میزان متغیربودن هر بار هستند، که براساس تحلیل‌های گسترده‌ی آماری به دست آمده‌اند.[۱] همچنین در روش ذکرشده، ضرایب φ،[۶] که کمتر از ۱ هستند، در مقاومت موجود مصالح ضرب می‌شوند و درنهایت باید شرط مطرح‌شده در رابطه‌ی ۲ در طراحی برقرار باشد:

$$P_u \leq \varphi * P_n \qquad (۲)$$

شکل ۱، تابع چگالی احتمال را برای مقادیر محتمل بار و مقاومت نشان می‌دهد. منحنی طرف چپ در شکل مذکور، بیانگر مقدار بار و منحنی طرف راست بیانگر مقاومت است. بالاترین احتمال گسیختگی در محلی رخ می‌دهد که نمودار مقاومت و بار به هم می‌رسند. هرچه مقدار مقاومت افزایش یابد نمودار مقاومت به سمت راست حرکت می‌کند و احتمال گسیختگی کمتر می‌شود. منحنی‌ها نشانگر محتملترین مقدار برای بار و مقاومت هستند و عرض هر نمودار بیانگر پراکندگی مقادیر است.[۱]

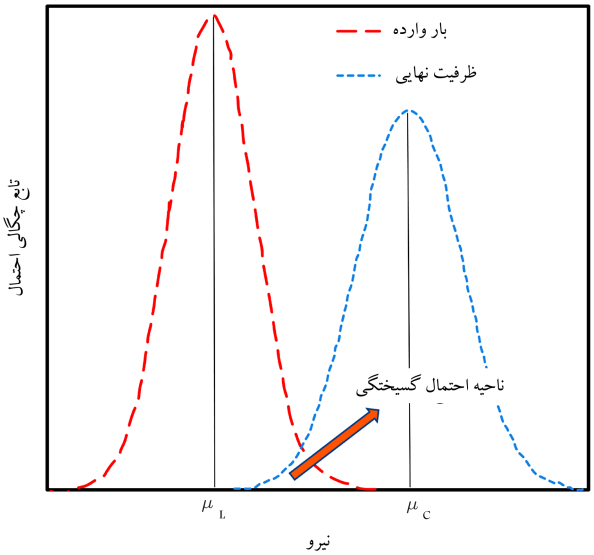
در واقع، در روش LRFD با افزایش بار و کاهش مقاومت، نمودار مقاومت و بار به هم نزدیک می‌شوند (در جهت محافظه‌کارانه، سطح محتمل گسیختگی زیاد می‌شود) و می‌توان با اندازه‌گیری سطح مشترک بین نمودار بار و مقاومت، احتمال

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۰/۹، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۲۱، پذیرش ۱۳۹۴/۴/۱.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. ضرایب بار.[۲]

بارها	اروپا		کانادا		آمریکا			
	ECS	DGI	NRC	MOT	API	AISC	ACI	AASHTO
مرده	۱/۳۵ – ۱	۱	۱/۲۵	۱/۵ – ۱/۱	۱/۳ – ۱/۱	۱/۴ – ۱/۲	۱/۴	۱/۹۵ – ۱/۲۵
زنده	۱/۵ – ۱/۳	۱/۳	۱/۵	۱/۴ – ۱/۱۵	۱/۵ – ۱/۱	۱/۶	۱/۷	۱/۷۵ – ۱/۳۵
باد	۱/۵ – ۱/۳	۱/۳	۱/۵	۱/۳	۱/۳۵ – ۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۴
زلزله	۱	۱	۱	۱/۳	۰/۹	۱	۱/۴	۱



شکل ۱. تابع چگالی احتمال برای ظرفیت نهایی و بار وارده.[۱]

وقوع گسیختگی را ارزیابی کرد. مزیت اصلی روش مذکور این است که احتیاجی نیست که مهندسان جهت طراحی، تحلیل آماری انجام دهند.[۱]

۲.۱. روش LRFD در آیین‌نامه‌های مختلف

روش LRFD، اولین بار در سال ۱۹۶۰ در طراحی بتن مسلح استفاده شده است. همچنین در سال ۱۹۸۶ در آیین‌نامه‌ی فولاد آمریکا[۷] نیز مورد استفاده قرار گرفته است.[۱]

در سال‌های اخیر، آیین‌نامه‌هایی در اروپا، آمریکا و کانادا روش LRFD را در خود گنجانده‌اند. همچنین آیین‌نامه‌ی ACI [۸] استفاده از این روش را در طراحی پی‌های سطحی توصیه می‌کند. آیین‌نامه‌ی AASHTO [۹] (۱۹۹۴) ضرایبی را جهت ترکیب بار و کاهش مقاومت ارائه می‌دهد، که مشابه ضرایبی است که در طراحی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند.[۲]

قبل از آنکه مقایسه‌یی بین ضرایب بار و مقاومت بین آیین‌نامه‌های مختلف در این نوشتار انجام شود، ابتدا لازم است که مفهوم حالات حدی توضیح داده شود. حالات حدی به مجموعه‌ی شرایطی گفته می‌شود که عملکرد سیستم سازه‌یی یا ژئوتکنیکی را دچار مشکل کند. به‌طورکلی حالات حدی را می‌توان به ۲ گروه تقسیم کرد:

۱. حالات حدی نهایی مربوط به آسیب‌های سازه‌یی است که منجر به ناپایداری سازه می‌شود. در شالوده‌های سطحی، مفهوم کلاسیک ظرفیت باربری، نمونه‌یی از حالات حدی نهایی است.

۲. حالات حدی سرویس‌دهی به شرایطی گفته می‌شود که سرویس‌دهی و کارایی سازه در اثر بارهای سرویس مورد انتظار دچار اختلال شود. ایجاد ترک در دیوارها و تغییرشکل بیش از حد سازه، نمونه‌هایی از حالات حدی سرویس‌دهی هستند.

آیین‌نامه‌های AASHTO (۱۹۹۸)، ACI (۱۹۹۹)، AISC (۱۹۹۴)، API [۱۰] (۱۹۹۳)، MOT [۱۱] (۱۹۹۲)، NRC [۱۲] (۱۹۹۵)، DGI [۱۳] (۱۹۸۵) و ECS [۱۴] (۱۹۹۴)، ضرایب بار را برای حالات حدی برای ساختمان‌ها، پل‌ها، و فونداسیون سازه‌های ساحلی و دور از ساحل ارائه کرده‌اند، که در جدول ۱ ارائه شده است.[۲]

در شرایط حدی، ضرایب بار و ترکیب بار بسیار متنوع‌تری را در طراحی سازه‌های دریایی و پل‌ها باید لحاظ کرد. در جدول ۱، ضرایب بار برای ۴ بار: مرده، زنده، باد، و زلزله، که تقریباً در طراحی همه‌ی سازه‌ها استفاده می‌شوند، ارائه شده است تا مقایسه‌یی بین آیین‌نامه‌ها انجام شود. مشاهده می‌شود که تفاوت‌هایی در ضرایب بار بین آیین‌نامه‌های ساختمانی، پل‌ها، و سازه‌های دریایی وجود دارد. غالباً مقادیر ضرایب بار برای سازه‌های دریایی API (۱۹۹۳)، پل‌ها AASHTO (۱۹۹۸) و MOT (۱۹۹۲)، گستره‌ی بیشتری در قیاس با آیین‌نامه‌های ساختمانی و ساحلی دارند. توجه شود که ضرایب بار ۱ و کمتر از ۱ برای بار زلزله، در ترکیب با سایر بارها به‌کار برده می‌شود.[۲]

۲. آیین‌نامه‌ی API

مؤسسه‌ی نفت آمریکا توصیه‌هایی را برای طراحی شمع‌ها تحت بار محوری در نشریه‌ی API RP 2A با عنوان «توصیه‌های عملی برای طراحی و ساخت سکوهای دریایی[۱۵]» بر مبنای داده‌های وسیع از آزمایش‌های بارگذاری شمع‌ها ارائه کرده است، که مرتباً ارزیابی و به روزرسانی می‌شود. آیین‌نامه‌ی مذکور عمدتاً با هدف تحلیل و طراحی شمع در سازه‌های فراساحل و نزدیک ساحل تهیه و تدوین شده است. در سازه‌های مذکور، عمدتاً از شمع‌های لوله‌یی فولادی توخالی با نوک باز استفاده می‌شود، که با استفاده از چکش در لایه‌های بستر دریا کوبیده می‌شوند.

۲.۱. طراحی محوری شمع براساس روش تنش مجاز (API RP 2A-WSD)

با داشتن مقادیر مقاومت زهکشی‌نشده (Su) در خاک‌های چسبنده و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ)، آیین‌نامه‌ی API در خاک‌های غیرچسبنده، روش تنش مجاز را جهت ارزیابی ظرفیت شمع ارائه کرده است. جهت محاسبه‌ی اصطکاک واحد طول جداره (f_s) در خاک‌های چسبنده از رابطه‌های ۳ الی ۵ استفاده

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. پارامترهای طراحی برای خاک‌های غیرچسبنده.[۳]

نوع خاک	تراکم نسبی	زاویه‌ی اصطکاک خاک و شمع δ (درجه)	حد نهایی مقاومت جداره (kPa)	N_q	حد نهایی مقاومت نوک (MPa)
ماسه ماسه ـ لای لای	خیلی شل شل متوسط	۱۵	۴۷٫۸	۸	۱٫۹
ماسه ماسه ـ لای لای	شل متوسط متراکم	۲۰	۶۷	۱۲	۲٫۹
ماسه ماسه ـ لای	متوسط متراکم	۲۵	۸۱٫۳	۲۰	۴٫۸
ماسه ماسه ـ لای	متراکم خیلی متراکم	۳۰	۹۵٫۷	۴۰	۹٫۶
شن ماسه	متراکم خیلی متراکم	۳۵	۱۱۴٫۸	۵۰	۱۲

می‌شود:[۳]

$$f_s = \alpha C_u \qquad (۳)$$

$$\alpha = ۰٫۵\Psi^{-۰٫۲۵} \quad \Psi \geq ۱ \qquad (۴)$$

$$\alpha = ۰٫۵\Psi^{-۰٫۵} \quad \Psi \leq ۱ \qquad (۵)$$

که در آنها، $\alpha \leq ۱$ و $\Psi = \frac{C_u}{p_\circ}$ است و $p_\circ$ تنش مؤثر قائم و C_u مقاومت برشی زهکشی‌نشده‌ی خاک در تراز موردنظر است.[۳] محاسبه‌ی اصطکاک واحد طول جداره (f_s) در خاک‌های غیرچسبنده مطابق رابطه‌ی ۶ است:[۳]

$$f_s = K * P_\circ * \tan\delta \qquad (۶)$$

که در آن، K ضریب فشار جانبی خاک است، که برای شمع‌های لوله‌یی با نوک باز (که در آن‌ها خاک محبوس تشکیل نشود) توصیه شده است که $K = ۰٫۸$ باشد و همچنین برای شمع‌های با تغییرمکان زیاد (خاک محبوس شده یا نوک بسته) $K = ۱$ در نظرگرفته شود. δ زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و جداره‌ی شمع است، که از جدول ۲ به‌دست می‌آید.[۳]

همچنین به‌منظور محاسبه‌ی مقاومت نوک در خاک‌های چسبنده از رابطه‌ی $q = ۹C_u$ و در خاک‌های غیرچسبنده از رابطه‌ی $q = N_q P_\circ$ استفاده می‌شود، که N_q ضریب بی‌بُعدی است که مطابق جدول ۲ تعیین می‌شود.[۳]

در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، با مقایسه‌ی روش ذکرشده برای خاک‌های غیرچسبنده با نتایج آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس نشان داده شده است که آیین‌نامه‌ی API، ظرفیت محوری شمع‌های کوتاه در خاک ماسه‌یی متراکم را کمتر از واقعیت و شمع‌های بلند واقع در خاک سُل را بیش از واقعیت پیش‌بینی می‌کند.[۴] درنهایت، مقاومت نهایی از مجموع مقاومت جداره و نوک حاصل می‌شود (رابطه‌ی ۷):[۳]

$$Q = f_s A_s + q A_t \qquad (۷)$$

ظرفیت باربری مجاز از تقسیم مقاومت نهایی بر ضریب اطمینان به‌دست می‌آید (جدول ۳).

جدول ۳. ضرایب اطمینان.[۵]

شرایط اعمال بار	ضرایب اطمینان
ترکیب بار محیطی و بار ناشی از حفاری حین بهره‌برداری	۱٫۵
ترکیب بار محیطی و بار ناشی از حفاری در شرایط شدید محیطی	۲
ترکیب بار محیطی با بارهای ثقلی کمینه (برای ظرفیت کششی)	۱٫۵

۲.۲. طراحی محوری شمع براساس روش مقاومت نهایی (API RP۲A-LRFD)

در روش مقاومت نهایی، ضرایب اطمینان به منظور جبران عدم قطعیت در بارگذاری و مقاومت مورد استفاده قرار می‌گیرند. براساس آیین‌نامه‌ی API RP ۲A-LRFD (۲۰۰۷)، مقاومت محوری باید این شرایط را ارضا کند:

۱. حاصل‌ضرب ضریب کاهش مقاومت در شرایط محیطی شدید ($\phi_{PE} = ۰٫۸$) در مقاومت نهایی شمع، از مقدار بار در شرایط محیطی شدید بیشتر باشد.[۵] منظور از شرایط محیطی، بارهایی همچون زلزله، باد، برف، و موج است، که توسط پدیده‌های طبیعی بر سازه تحمیل می‌شوند (رابطه‌ی ۸):

$$P_{DE} < \phi_{PE} Q_D \qquad (۸)$$

۲. حاصل‌ضرب ضریب مقاومت در شرایط بهره‌برداری ($\phi_{PO} = ۰٫۷$) در مقاومت نهایی شمع، از مقدار بار در شرایط محیطی بهره‌برداری بیشتر باشد (رابطه‌ی ۹):

$$P_{DO} < \phi_{PO} Q_D \qquad (۹)$$

توجه شود که Q_D همان مقاومت نهایی محوری شمع است، که از روش تنش مجاز به‌دست می‌آید. برای بارهای ثقلی از ترکیب بار مطابق رابطه‌ی ۱۰، جهت محاسبه‌ی بار وارده استفاده می‌شود:

$$Q = ۱٫۳D_۱ + ۱٫۳D_۲ + ۱٫۵L_۱ + ۱٫۵L_۲ \qquad (۱۰)$$

که در آن، $D_۱$ وزن خود سازه، $D_۲$ وزن اعمال شده توسط سکو و تجهیزات آن، $L_۱$ بار زنده‌ی ناشی از سیال درون لوله‌های انتقال، و در نهایت، $L_۲$ به بارهایی گفته می‌شود که در بازه‌ی زمانی کم در اثر فرایندهایی همچون حفاری بر سازه اعمال می‌شوند.[۵] برای بارهای باد و موج در شرایط محیطی شدید از ترکیب بار طبق رابطه‌ی ۱۱ استفاده می‌شود:

$$Q = ۱٫۱D_۱ + ۱٫۱D_۲ + ۱٫۱L_۱ + ۱٫۳۵W_e \qquad (۱۱)$$

که در آن، W_e بار ناشی از اثر توأمان امواج شدید (با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال) و باد است.[۵]

همچنین در شرایط بهره‌برداری از ترکیب بار مطابق رابطه‌ی ۱۲ استفاده می‌شود:

$$Q = ۱٫۳D_۱ + ۱٫۳D_۲ + ۱٫۵L_۱ + ۱٫۵L_۲ + ۱٫۲W_e \qquad (۱۲)$$

۳. استاندارد Eurocode

استاندارد Eurocode، مجموعه‌یی از آیین‌نامه‌های اروپایی برای طراحی‌های سازه‌یی و ژئوتکنیکی است، که خود شامل ۱۰ سری استاندارد است، که استاندارد هفتم آن

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۴. ضرایب همبستگی.[۶]

ξ for $n=$	۱	۲	۳	۴	۵	۷	۱۰
ξ_3	۱٫۴	۱٫۳۵	۱٫۳۳	۱٫۳۱	۱٫۲۹	۱٫۲۷	۱٫۲۵
ξ_4	۱٫۴	۱٫۲۷	۱٫۲۳	۱٫۲	۱٫۱۵	۱٫۱۲	۱٫۰۸

(EN ۱۹۹۷) در مورد طراحی‌های ژئوتکنیکی بحث می‌کند، که شامل دو بخش است: بخش اول، در مورد قوانین کلی طراحی و بخش دوم، درخصوص نحوه‌ی استفاده از نتایج آزمایشگاهی و صحرایی در طراحی است. فصل هفتم از بخش اول آیین‌نامه‌ی مذکور، اختصاص به طراحی شمع‌ها دارد. مفهوم جدیدی که در بخش اول ارائه می‌شود، ضرایب همبستگی ξ است که مقادیر آن‌ها بزرگ‌تر از ۱ است، که بر مقدار مقاومت نهایی تقسیم می‌شوند. مقادیر ضرایب مذکور در جدول ۴ ارائه شده است. هر چه تعداد آزمایش‌های بارگذاری شمع و یا تعداد گمانه‌های حفرشده برای به دست‌آوردن پارامترهای خاک بیشتر باشد، مقدار این ضرایب به ۱ نزدیک‌تر است.[۶]

۱.۳. مفهوم کنش‌ها

کنش‌ها که در استاندارد اروپا Action نامیده می‌شوند، می‌توانند نیروهایی باشند که بر سازه یا خاک وارد می‌شوند و یا جابه‌جایی‌ها و شتاب‌هایی باشند که توسط خاک بر سازه تحمیل می‌شوند. بارهای وارده می‌توانند به‌صورت دائمی (مثل: وزن سازه یا خاک)، متغیر (مثل: بار زنده)، و یا تصادفی (مثل: نیروی ضربه) باشند. برای شمع‌ها، عمده‌ی بارها ناشی از سازه‌ی فوقانی، فشار سربار، بارهای ترافیکی، و جابه‌جایی‌های زمین هستند. از مهم‌ترین بارهایی که در اثر جابه‌جایی زمین بر شمع وارد می‌شوند، می‌توان به اصطکاک منفی ناشی از نشست، بالاآمدگی خاک، و جابه‌جایی‌های افقی خاک اشاره کرد.[۷]

۲.۳. طراحی محوری شمع براساس Eurocode

ابتدا مقاومت نهایی R برای یک شمع با استفاده از پارامترهای c و φ برای خاکی که خصوصیات آن با حفاری گمانه به دست می‌آید، محاسبه می‌شود. سپس از مقادیر مقاومت به دست‌آمده، مقدار میانگین و کمینه تعیین می‌شود. همچنین براساس تعداد گمانه‌ها، ضریب همبستگی ξ از جدول ۴ استخراج و سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱۳، مقاومت مشخصه تعیین می‌شود:[۸]

$$R_k = \mathrm{Min}\{R_{cal,mean}/\xi_3; R_{cal,\min}/\xi_4\} \qquad (۱۳)$$

که در آن، $R_{cal,mean}$ و $R_{cal,\min}$ به ترتیب مقادیر میانگین و کمینه‌ی مقاومت نهایی محاسبه‌شده برای شمع است. سپس مقاومت طراحی R_d از رابطه‌ی ۱۴ تعیین می‌شود:[۸]

$$R_d = R_K/\gamma_t \qquad (۱۴)$$

در صورتی که مقادیر مقاومت مشخصه‌ی جداره و نوک شمع به طور جداگانه مشخص باشند، مقاومت طراحی R_d از رابطه‌ی ۱۵ تعیین می‌شود:[۷]

$$R_d = R_{bk}/\gamma_b + R_{sk}/\gamma_s \qquad (۱۵)$$

که در روابط ۱۴ و ۱۵، γ_t، γ_s، و γ_b ضرایب اطمینان جزئی هستند، که مقادیر آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین با اعمال ضریب، بار وارده باید افزایش یابد (رابطه‌ی ۱۶):[۸]

$$F_d = \gamma_F * F_k \qquad (۱۶)$$

مقادیر γ_F برای بارهای دائمی و متغیر، عددی متفاوت است، که در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

در استفاده از مقادیر جدول‌های ۵ و ۶ باید توجه داشت که برای طراحی، Eurocode سه رویکرد[۱۶] پیشنهاد می‌کند (DA-۳، DA-۲ و DA-۱) تفاوت اصلی این رویکردها در نحوه‌ی اعمال ضرایب است.

در روش اول و دوم، مقاومت مشخصه براساس تعداد گمانه‌ها و ضریب ξ محاسبه و سپس ضرایب اطمینان جزئی به مقاومت مشخصه اعمال می‌شود. در روش سوم، ابتدا براساس تعداد گمانه‌ها و روابط آماری، از روی پارامترهای مقاومتی خاک (c و $\tan\varphi$)، پارامترهای مشخصه‌ی خاک به دست می‌آید. پارامترهای مشخصه بر ضرایب اطمینان جزئی، که در جدول ۷ ارائه شده‌اند، تقسیم می‌شود و در رابطه‌ی ظرفیت باربری جایگذاری می‌شود تا ظرفیت باربری طراحی (R_d) به دست آید. درنهایت، شرط آنکه طراحی شمع مورد قبول باشد، مطابق رابطه‌ی ۱۷ است:[۸]

$$F_d \le R_d \qquad (۱۷)$$

۴. آیین‌نامه‌ی ژئوتکنیک کانادا

آیین‌نامه‌ی ژئوتکنیک کانادا توسط انجمن ژئوتکنیک کانادا (۱۹۷۸) منتشر شده و شامل ۴ بخش است:[۹]

۱. راهنمای طراحی برای مسائل معمول ژئوتکنیک براساس روابط معتبر.

۲. خلاصه‌یی پیرامون محدودیت‌های هرکدام از روش‌های طراحی.

۳. اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های خاک و سنگ با توجه ویژه به شرایط محلی کشور کانادا.

۴. توصیه‌هایی در مورد مسائل اجرایی.

۱.۴. طراحی شمع با بار محوری براساس آیین‌نامه‌ی کانادا

در خاک‌های غیرچسبنده، با استفاده از رابطه‌ی ۱۸ ظرفیت نوک شمع محاسبه می‌شود:[۹]

$$q_t = N_t * \sigma_{z=L} \qquad (۱۸)$$

در رابطه‌ی ۱۸، $\sigma_{z=L}$ تنش مؤثر در نوک شمع و N_t ضریب ظرفیت باربری است که از جدول ۸ به دست می‌آید. برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری جداره‌ی شمع در خاک‌های غیرچسبنده از رابطه‌ی ۱۹ استفاده می‌شود:[۹]

$$q_s = \beta\sigma'_v \qquad (۱۹)$$

که در آن، σ'_v تنش مؤثر در عمق موردنظر و β ضریبی است که از جدول ۹ قابل تعیین است.

آیین‌نامه‌ی کانادا بیان می‌کند که تعیین ظرفیت باربری شمع در خاک‌های چسبنده، خصوصاً در خاک‌های رس با مقاومت برشی متوسط و زیاد، با عدم قطعیت‌هایی همراه است. در شرایطی که توجیه اقتصادی داشته باشد، آزمایش‌های

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۵. ضریب اطمینان جزئی.[۸]

	رویکرد ۳	رویکرد ۲	رویکرد ۱						
			ترکیب بار ۱ (رویکرد ۲-۱)			ترکیب بار ۲ (رویکرد ۱-۱)			
نوع شمع	$\gamma_s=\gamma_b=\gamma_t$	$\gamma_s=\gamma_b=\gamma_t$	γ_t	γ_s	γ_b	γ_t	γ_s	γ_b
کوبشی	۱	۱٫۱	۱٫۳	۱٫۳	۱٫۳	۱	۱	۱
حفاری شده	۱	۱٫۱	۱٫۵	۱٫۳	۱٫۶	۱٫۱۵	۱	۱٫۲۵
شمع اجرا شده با اوگر پیوسته *	۱	۱٫۱	۱٫۴	۱٫۳	۱٫۴۵	۱٫۱	۱	۱٫۱

* Continuous Flight Auger Cast (CFA)

جدول ۶. ضرایب بار.[۸]

	نوع بار	رویکرد ۳	رویکرد ۲	رویکرد ۱-۲	رویکرد ۱-۱
دائمی	نامساعد γ_G	۱٫۳۵	۱٫۳۵	۱	۱٫۳۵
	مساعد γ_G	۱	۱	۱	۱
متغیر	نامساعد γ_Q	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵
	مساعد γ_Q	۰	۰	۰	۰

جدول ۷. ضرایب اطمینان جزئی.[۸]

پارامتر خاک	نماد ضرایب اطمینان جزئی	مقادیر
تانژانت زاویه‌ی اصطکاک داخلی	γ_φ	۱٫۲۵
چسبندگی	γ_C	۱٫۲۵
مقاومت زهکشی‌نشده	γ_{Cu}	۱٫۴
مقاومت محصورنشده	γ_{qu}	۱٫۴

جدول ۸. مقادیر N_t در آیین‌نامه‌ی کانادا.[۹]

نوع خاک	شمع کوبشی	شمع درجاریز
لای	۲۰ – ۴۰	۱۰ – ۳۰
ماسه‌ی شل	۳۰ – ۸۰	۲۰ – ۳۰
ماسه‌ی متوسط	۵۰ – ۱۲۰	۳۰ – ۶۰
ماسه‌ی متراکم	۱۰۰ – ۱۲۰	۵۰ – ۱۰۰
شن	۱۵۰ – ۳۰۰	۸۰ – ۱۵۰

جدول ۹. مقادیر β در آیین‌نامه‌ی کانادا.[۹]

نوع خاک	شمع کوبشی	شمع درجاریز
لای	۰٫۳ – ۰٫۵	۰٫۲ – ۰٫۳
ماسه‌ی شل	۰٫۳ – ۰٫۸	۰٫۲ – ۰٫۴
ماسه‌ی متوسط	۰٫۶ – ۱	۰٫۳ – ۰٫۵
ماسه‌ی متراکم	۰٫۸ – ۱٫۲	۰٫۴ – ۰٫۶
شن	۰٫۸ – ۱٫۵	۰٫۴ – ۰٫۷

شمع در این نوع خاک‌ها اولویت دارند، وگرنه باید از ضرایب اطمینان بالاتر استفاده کرد. بر این اساس، آیین‌نامه‌ی کانادا دو دیدگاه تنش مؤثر و تنش کل را مطرح می‌کند.[۹]

تاکنون در بیشتر مواقع، جهت ارزیابی ظرفیت شمع در خاک‌های رسی از روش تنش کل و یا همان مقاومت برشی زهکشی‌نشده استفاده می‌شده است. اما در شرایطی که مقاومت برشی زهکشی‌نشده (C_u) از حدود ۲۵ کیلوپاسکال بیشتر شود، صحت این روش به اثبات نرسیده است. بنابراین طراحی براساس روش تنش مؤثر، که برای خاک‌های دانه‌یی به‌کار می‌رود، منطقی‌تر به نظر می‌رسد. آیین‌نامه‌ی مذکور، این مقادیر را برای ضرایب N_t و β بر مبنای تحلیل تنش مؤثر در خاک‌های رسی به نقل از Burland (۱۹۷۳)، Skempton (۱۹۵۱) و Ladaniy (۱۹۶۳) ارائه کرده است (روابط ۲۰ و ۲۱):[۹]

$$\beta = ۰٫۲۵ - ۰٫۳۲ \qquad (۲۰)$$

$$N_t = ۳ - ۱۰ \qquad (۲۱)$$

همچنین آیین‌نامه‌ی کانادا بیان می‌کند برای شمع‌های کوبیده‌شده در خاک‌های رسی با $C_u \leq ۱۰۰$ kPa می‌توان از روش α جهت محاسبه‌ی مقاومت جداره استفاده کرد. اما برای خاک‌های با $C_u \geq ۱۰۰$ kPa، مقاومت جداره به راحتی قابل تعیین نیست، زیرا در مورد اثر کوبش در این خاک‌ها و سطح تماس مؤثر بین خاک و شمع اطلاعات کمی وجود دارد. در این شرایط، طراحی نهایی باید براساس آزمایش‌های شمع انجام پذیرد.[۹]

۵. ارزیابی طراحی شمع با بار محوری از روش‌های مختلف

۱.۵. مقایسه‌ی روش WSD و LRFD در آیین‌نامه‌ی API

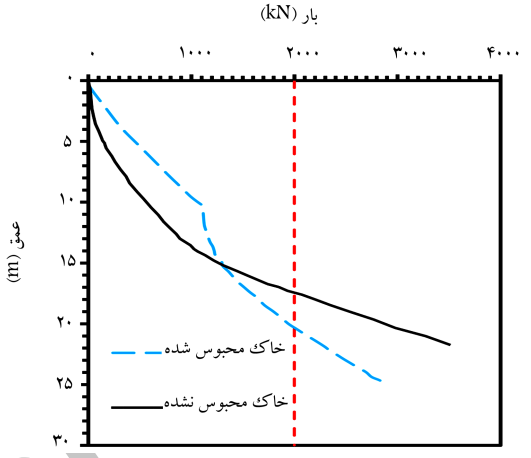
برای نشان‌دادن تفاوت‌های موجود بین دو روش WSD و LRFD، عمق نفوذ مورد نیاز شمعی که در خاک با مشخصات جدول ۱۰ قرار می‌گیرد، از ۲ روش محاسبه شده است. مقطع شمع، به‌صورت لوله‌یی با قطر خارجی ۶۱۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۹ میلی‌متر است. با دو فرض خاک در انتهای شمع محبوس‌شده و محبوس‌نشده، ظرفیت باربری شمع بررسی شده است. در فرض اول، مقاومت کل برابر مجموع مقاومت تمام مقطع نوک شمع و مقاومت جداره‌ی خارجی آن است. در فرض دوم، مقاومت کل برابر مجموع مقاومت نوک شمع و مقاومت جداره‌ی خارجی و داخلی آن است. بار مرده ۱۰۰۰ کیلونیوتن، بار زنده ۶۰۰ کیلونیوتن، و بار محیطی ۴۰۰ کیلونیوتن است. در روش WSD، ضریب اطمینان ۱٫۵ فرض شده و بار طراحی برابر مجموع بارهای مرده، زنده، و محیطی، یعنی ۲۰۰۰ کیلونیوتن

Archive of SID

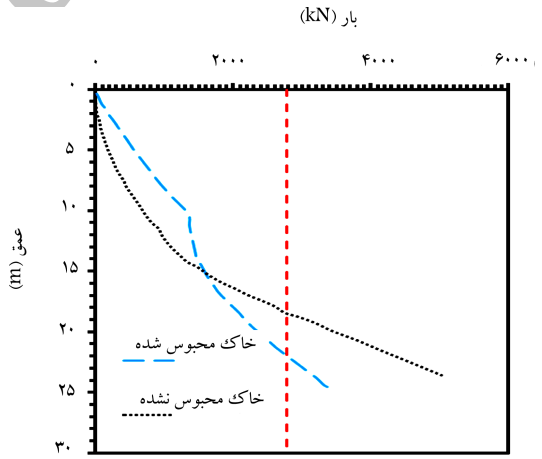
www.SID.ir

جدول ۱۰. پارامترهای خاک.[۱۰]

عمق	نوع خاک	وزن مخصوص غوطه‌ور (kN/m^3)	زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	مقاومت زهکشی‌نشده (kPa)
۰ – ۲٫۳	ماسه	۹٫۵	۳۰	
۲٫۳ – ۳٫۲	رس	۱۰		۱۵۰
۳٫۲ – ۱۵	ماسه	۱۰	۳۲٫۵	
۱۵ – ۲۵	رس سخت	۱۱٫۳		۳۳۰



شکل ۲. روش WSD.[۱۰]



شکل ۳. روش LRFD.[۱۰]

است. در روش LRFD ضرایب ۱٫۳، ۱٫۵ و ۱٫۳۵ به ترتیب برای بارهای مرده، زنده، و محیطی استفاده و ضریب کاهش مقاومت (φ)، ۰٫۸ لحاظ شده است.[۱۰]

در شکل‌های ۲ و ۳، بار طراحی با خط‌چین نشان داده شده و ظرفیت باربری با هر دو فرض خاک محبوس‌شده و خاک محبوس‌نشده بر حسب عمق نشان داده شده است.

براساس شکل‌های ۲ و ۳، کمینه‌ی عمق نفوذ برای شمع در روش WSD، ۲۰٫۳ متر و در روش LRFD، ۲۱٫۶ متر است.[۱۰]

جدول ۱۱. مقادیر مقاومت برشی زهکشی‌نشده.[۷]

	مقادیر میانگین C_u (kPa)			
	گمانه‌ی ۱	گمانه‌ی ۲	گمانه‌ی ۳	میانگین کل گمانه‌ها
$C_{u,shaft}$	۵۲	۴۶	۵۱	۵۰
$C_{u,base}$	۳۳	۳۰	۴۲	۳۵

۲.۵. مقایسه‌ی رویکردهای طراحی‌های ۱، ۲ و ۳ در استاندارد Eurocode و مقایسه‌ی آنها با روش WSD

هدف از این مثال، تعیین کافی‌بودن عمق نفوذ شمع درجاریز با قطر ۰٫۸ متر و طول ۱۸٫۵ متر در خاک رسی است. تعداد ۳ گمانه‌ی حفرشده و مقادیر مقاومت زهکشی‌نشده در هر گمانه در جدول ۱۱ ارائه شده است. بار وارده به شمع شامل ۶۰۰ کیلونیوتن بار دائمی و ۳۰۰ کیلونیوتن بار متغیر است.[۷]

ـ تعیین مقاومت اسمی شمع با فرض $\alpha = ۰٫۷۵$ (مطابق روابط ۲۲ و ۲۳):

$$R = R_s + R_b = \pi BL\alpha C_{u,shaft} + (\pi B^2/4) * 9C_{u,base} \quad (۲۲)$$

$$R = ۳۴٫۹ * C_{u,shaft} + ۴٫۵ * C_{u,base} \quad (۲۳)$$

برای هر گمانه، R_{base}, R_{shaft} محاسبه می‌شود:[۶]

$$BH۱ : R_{base} = ۱۴۸\ kN \qquad R_{shaft} = ۱۸۱۵\ kN$$

$$BH۲ : R_{base} = ۱۳۵\ kN \qquad R_{shaft} = ۱۶۰۵\ kN$$

$$BH۳ : R_{base} = ۱۸۹\ kN \qquad R_{shaft} = ۱۷۸۰\ kN$$

ضرایب همبستگی از جدول ۴ برای $n = ۳$ استخراج و مقاومت مشخصه‌ی نوک و جداره تعیین شده است (روابط ۲۴ و ۲۵):[۷]

$$R_{s,k} = \text{Min}\{R_{s,k,mean}/\xi_۳; R_{s,k,\min}/\xi_۴\} = ۱۶۰۵/۱٫۲۳ = ۱۳۰۵\ kN \quad (۲۴)$$

$$R_{b,k} = \text{Min}\{R_{b,k,mean}/\xi_۳; R_{b,k,\min}/\xi_۴\} = ۱۳۵/۱٫۲۳ = ۱۱۰\ kN \quad (۲۵)$$

ـ رویکرد ۱، ترکیب بار ۱ (روابط ۲۶ و ۲۷):

$$R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = ۱۳۰۵/۱٫۰ + ۱۱۰/۱٫۲۵ = ۱۳۹۳\ kN \quad (۲۶)$$

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = ۱٫۳۵ * ۶۰۰ + ۱٫۵ * ۳۰۰ = ۱۲۶۰\ kN$$

$$F_d \le R_d \rightarrow ۱۲۶۰ \le ۱۳۹۳ \quad (۲۷)$$

ـ رویکرد ۱، ترکیب بار ۲ (روابط ۲۸ و ۲۹):

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = ۱ * ۶۰۰ + ۱٫۳ * ۳۰۰ = ۹۹۰\ kN \quad (۲۸)$$

$$R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = ۱۳۵۰/۱٫۳ + ۱۱۰/۱٫۶ = ۱۰۷۳\ kN$$

$$F_d \le R_d \rightarrow ۹۹۰ \le ۱۰۷۳ \quad (۲۹)$$

بنابراین طبق رویکرد ۱، شمع با طول ۱۸٫۵ متر جوابگوست، ولی می‌توان از شمع کوتاه‌تری نیز استفاده کرد.[۷]

Archive of SID
www.SID.ir

-- رویکرد ۲ (روابط ۳۰ و ۳۱):

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = ۱٫۳۵ * ۶۰۰ + ۱٫۵ * ۳۰۰ = ۱۲۶۰ \text{ kN} \quad (۳۰)$$

$$R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = ۱۳۰۵/۱٫۱ + ۱۱۰/۱٫۱ = ۱۲۸۶ \text{ kN} \quad (۳۱)$$

طبق رویکرد ۲، شمع با طول ۱۸٫۵ متر به صورت بهینه جوابگوی بار وارده است.[۷]

-- رویکرد ۳ (رابطه‌ی ۳۲):

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = ۱٫۳۵ * ۶۰۰ + ۱٫۵ * ۳۰۰ = ۱۲۶۰ \text{ kN} \quad (۳۲)$$

در این رویکرد، ابتدا مقادیر مشخصه‌ی C_u برای جداره و نوک شمع براساس روش‌های آماری مزبور در فصل دوم از منبع[۷] تعیین می‌شود:

$$C_{u,k,base} = ۳۲ \text{ kPa}$$
$$C_{u,k,shaft} = ۴۷ \text{ kPa}$$

سپس از جدول ۷، ضرایب اطمینان جزئی و در نهایت مقادیر طراحی تعیین می‌شود:[۷]

$$C_{u,d,base} = ۳۲/۱٫۴ = ۲۲٫۹ \text{ kPa}$$
$$C_{u,d,shaft} = ۴۷/۱٫۴ = ۳۳٫۶ \text{ kPa}$$
$$R_d = ۳۴٫۹ * C_{u,d,shaft} + ۴٫۵ * C_{u,d,base} = ۱۶۴۰ + ۱۴۴ = ۱۲۷۶ \text{ kN}$$

طبق رویکرد ۳، شمع با طول ۱۸٫۵ متر به‌صورت بهینه جوابگوی بار وارده است.[۷]

سیمپسون (۲۰۰۷) از مقایسه‌ی نتایج ۳ رویکرد طراحی در آیین‌نامه‌ی اروپا با نتایج آنالیز عددی اجزاء محدود به این نتیجه رسیده است که رویکرد اول و دوم، نتایج تقریباً مشابهی به دست می‌دهند، اما در مجموع رویکرد اول را مناسب‌تر ارزیابی کرده است.[۱۱] همچنین ابراهیم و همکاران (۲۰۱۳) از انجام مطالعه‌ی موردی بر روی شمع‌های مورد نیاز برای پروژه‌ی ساختمان السنت در نزدیکی شهر خارطوم واقع در کشور سودان به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از رویکردهای سه‌گانه‌ی آیین‌نامه‌ی اروپا به جای رویکرد تنش مجاز (WSD) با ضریب اطمینان ۲، ۲۴٪ از تعداد شمع‌های مورد نیاز را کاهش می‌دهد.[۱۲]

۳.۵. مقایسه‌ی روابط آیین‌نامه‌ی API با نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع و روابط تجربی مبتنی بر آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

اسلامی و همکاران (۲۰۱۳)، نتایج ۷۰ آزمایش بزرگ‌مقیاس بارگذاری استاتیکی شمع در ۴ منطقه در نزدیکی خلیج فارس را مورد بررسی قرار داده‌اند. قطر شمع‌ها عموماً بین ۱۵۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر و عمق مدفون آن‌ها بین ۱۵ تا ۳۶ متر بوده است. جهت تعیین ظرفیت باربری براساس آزمایش استاتیکی شمع، از روش داویسون استفاده شده است. همچنین ظرفیت باربری با بهره‌گیری از روش API و روابط تجربی مبتنی بر SPT اندازه‌گیری شده و مقایسه‌ی نتایج نشان داده است که روش API در قیاس با روابط تجربی SPT، مطابقت بیشتری با نتایج بارگذاری استاتیکی شمع دارد.[۱۳]

۶. آیین‌نامه‌های دیگر

از آیین‌نامه‌های معتبر دیگری که می‌توانند در طراحی شمع مورد استفاده قرار گیرد، می‌توان به آیین‌نامه‌ی راه آمریکا (FHWA) و آیین‌نامه‌ی طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران اشاره کرد.

فلسفه‌ی طراحی آیین‌نامه‌ی راه آمریکا، روش LRFD است. آیین‌نامه‌ی مذکور ۱۲ شرایط حدی را جهت بار طراحی معرفی می‌کند و براساس هر کدام از شرایط حدی، یک ترکیب بار خاصی را ارائه می‌دهد. لذا طراح باید با آگاهی از شرایط پروژه، یک یا چند عدد از آن‌ها را در طراحی لحاظ کند.[۱۴]

آیین‌نامه‌ی طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران ذکر می‌کند که مطمئن‌ترین روش برای تعیین ظرفیت محوری شمع‌ها، انجام آزمایش بارگذاری است. اصول و روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی مذکور، عمدتاً مشابه روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی کاناداست.

۷. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

روش‌های مبتنی بر احتمالات، جایگزین روش‌های قطعی در طراحی‌ها شده‌اند، زیرا روش‌های ذکرشده قابل اطمینان‌ترند.

روش‌های تصادفی، روش‌های مرتبه‌ی اول ممان دوم و روش LRFD از جمله روش‌های مهم مبتنی بر احتمالات هستند.

روش LRFD از پرکاربردترین روش‌های مبتنی بر احتمالات است. مزیت آن بر روش‌های مبتنی بر ضریب اطمینان (روش‌های قطعی) این است که عدم قطعیت ناشی از میزان بار وارده و مقاومت مصالح را به‌صورت جداگانه لحاظ می‌کند، هر چند که این امر تا حدودی طراحی را پیچیده می‌کند.

از مقایسه‌ی ضرایب افزایش بار در روش LRFD بین ۸ آیین‌نامه‌ی مختلف نتیجه می‌شود که گستره‌ی ضرایب بار و تنوع بارها در آیین‌نامه‌های طراحی پل و سازه‌های دریایی در قیاس با آیین‌نامه‌های ساختمانی بیشتر است.

آیین‌نامه‌ی API در طراحی سازه‌های دور از ساحل، هر دو روش LRFD و WSD را ارائه می‌کند. حل یک مثال عددی در مورد طراحی محوری شمع از هر دو روش مذکور نشان می‌دهد که عمق نفوذ مورد نیاز شمع در روش LRFD کمی از روش WSD بیشتر است.

استاندارد Eurocode، در طراحی شمع‌ها از روش LRFD بهره می‌گیرد. مفهوم جدیدی که توسط استاندارد مذکور ارائه می‌شود، ضرایب همبستگی ξ است. در واقع، این ضرایب اثر تعداد گمانه‌های حفرشده جهت تعیین پارامترهای خاک و یا تعداد آزمایش‌های بارگذاری شمع را در طراحی در نظر می‌گیرند.

از حل مثال عددی در مورد تعیین ظرفیت باربری با استفاده از استاندارد Eurocode نتیجه می‌شود که هر ۳ رویکرد طراحی، تقریباً نتایج مشابهی به‌دست می‌دهند. در مثال مطرح‌شده، رویکرد سوم نتایج محافظه‌کارانه‌تری به دست می‌دهد،

Archive of SID
www.SID.ir

اما نتیجه‌گیری به دست‌آمده کلی نیست و ممکن است برای سایر ترکیب بارها و پارامترهای خاک، رویکرد اول یا دوم محافظه‌کارانه‌تر شوند.

آیین‌نامه‌ی کانادا، جهت تعیین مقاومت نوک و جداره‌ی شمع، در خاک‌های غیرچسبنده، بازه‌یی از اعداد را برای ضرایب N_t و β مطرح می‌کند و طراح باید براساس قضاوت خود، مقداری برای آن‌ها تعیین کند. همچنین آیین‌نامه‌ی کانادا، در خاک‌های چسبنده با مقاومت زهکشی‌نشده‌ی بیش از ۲۵ کیلوپاسکال، رویکرد تنش مؤثر را در طراحی توصیه می‌کند. بنابراین، استفاده از آیین‌نامه‌ی کانادا، ابهاماتی را برای طراح به همراه دارد.

پانوشت‌ها

1. deterministic
2. stochastic
3. first-order second-moment method
4. load and resistance factor design
5. ultimate strength design
6. resistance factor
7. American institute of steel construction
8. american concrete institute
9. the American association of state highway and transportation officials
10. American petroleum institute
11. Ontario highway bridge design code
12. national building code of Canada
13. code of practice for foundation engineering
14. Eurocode 1
15. recommended practice for planning, designing and construction of fixed offshore platforms
16. design approach

منابع (References)

1. Coduto, D., *Foundation Design Principles and Practices*, 2nd edition, Prentice hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458 (2001).
2. Scott, B., Kim, B.J. and Salgado, R. "Assessment of current load factors for use in geotechnical load and resistance factor design", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**(4), pp. 287-295 (1 April 2003).
3. API, *RP 2A-WSD Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*, 21st edition, Errata and Supplement, **3**, Washington, DC: API (October 2007).
4. Thomassen, K.; Andersen, Lars V. and Ibsen, Lars B. "Comparison of design methods for axially loaded driven piles in cohesionless soil", *Proceedings of the 22ed International Offshore and Polar Engineering Conference Rhodes*, Greece (17-22 June 2012).
5. API, *RP 2A-LRFD Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms– Load and Resistance Factor Design*, Errata and Supplement, **1**, Washington, DC: API (2007).
6. Frank, R. "Design of Pile Foundations Following Eurocode 7", *Proceedings XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering*, Ljubljana, Slovenian Geotechnical Society, pp. 577-586 (29-31 May 2006).
7. Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvadas, M., Krebs, N. and Schuppener, B., *Designers Guide to EN-1997-1 Eurocode 7: Geotechnical Design-General Rules*, Thomas Telford Ltd (2004).
8. CEN, *Eurocode 7: Geotechnical design -Part 1: General Rules*, EN 1997-1:2004 (E), (F) and (G), European Committee for Standardization: Brussels (November 2004).
9. Canadian Geotechnical Society, *Canadian Foundation Engineering Manual*, 4th edition (2006).
10. Jegandan, S., Thusyanthan, N.I. and Robert, D.J. "Axial bearing capacity of driven piles in accordance with API and DNV", *Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies- Present and Future*, London, UK (12-14 September 2012).
11. Simpson, B. "Approaches to ULS design- the merits of design approach 1 in Eurocode 7", *First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk Shanghai Tongji University*, China (18-19 Oct. 2007).
12. Ibrahim, A.M., Ibrahim, M. and Omar, A.O. "Pile design using Eurocode 7: A case study", *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, **4**(3), pp. 70-80 (March 2013).
13. Eslami, A., Tajvidi, I. and Karimpour-Fard, M. "Efficiency of methods for determining pile axial capacity-applied to 70 cases histories in Persian Gulf northern shore", *International Journal of Civil Engineering*, **12**(1 and B), (Transaction B: Geotechnical Engineering), pp. 45-54 (January 2014).
14. FHWA, *Design and Construction of Driven Foundations*, Report No. FHWA-HI-97-013, Washington, D.C. (1998).

Archive of SID
www.SID.ir