

# مقایسه‌ی آیین‌نامه‌های مختلف برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌ها

محمد مهدی احمدی\* (استاد)

احسان کشمیری (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۱۳۹۵)  
دوره‌ی ۲-۳، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۳۱-۱۳۸، (یادداشت فنی)

علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر در ارائه‌ی روش‌های علمی در طراحی شمع‌ها، تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها به دلیل لزوم لحاظ کردن 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)، Eurocode ۷ (استاندارد اروپا) و آیین‌نامه‌ی کانادا بیان و در قالب یک مثال عددی، رویکردهای مختلف طراحی براساس آیین‌نامه‌های API و Eurocode ۷ مقایسه شده‌اند.

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

mmahmadi@sharif.edu  
eks\_keshmiri@mehr.sharif.ir

## ۱. مقدمه

در گذشته 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،<sup>[۱]</sup> که به آن روش سنتی و مرسوم روش طراحی قطعی (یا تعیینی)<sup>(۱)</sup> 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.<sup>[۱]</sup> هدف اصلی روش‌های احتمالاتی، کمی‌سازی احتمال یک پدیده است و هدف دیگر آنها، ارزیابی بهتر عوامل مختلف مؤثر در گسیختگی است.<sup>[۱]</sup> به‌طور کلی روش‌های احتمالاتی مهم عبارت‌اند از:

۱. روش اتفاقی<sup>۲</sup>

۲. روش مرتبه‌ی اول ممان دوم<sup>۳</sup>

۳. LRFD<sup>۴</sup>

## ۱.۱. روش LRFD

نام دیگر روش LRFD، مقاومت نهایی<sup>۵</sup> است. در روش مذکور، ضرایب<sup>۶</sup> به بارها

\* نویسنده مسؤل

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

اعمال می‌شود، که این ضرایب اغلب از ۱ بزرگ‌تر هستند (رابطه‌ی ۱):<sup>[۱]</sup>

$$P_u = P_1 \gamma_1 + P_2 \gamma_2 + \dots \quad (1)$$

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

$$P_u \leq \varphi * P_n \quad (2)$$

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.<sup>[۱]</sup> 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

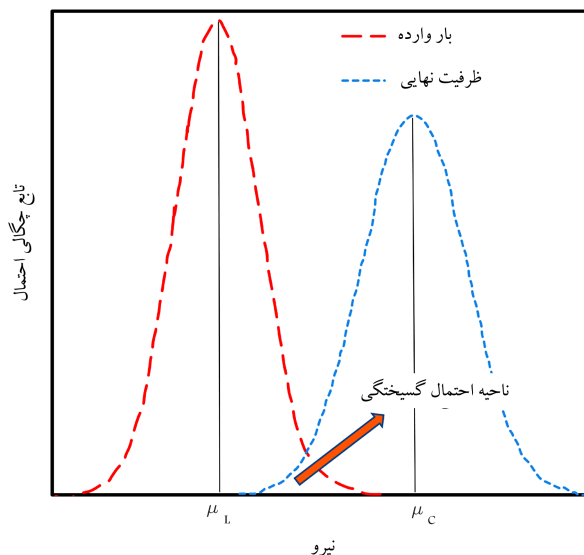
جدول ۱. ضرایب بار. [۲]

بارها	اروپا		کانادا		آمریکا		
	DGI	ECS	MOT	NRC	AASHTO	ACI	AISC
مرده	۱	۱٫۳۵ - ۱	۱٫۵ - ۱٫۱	۱٫۲۵	۱٫۲۵ - ۱٫۲۵	۱٫۴	۱٫۴ - ۱٫۲
زنده	۱٫۳	۱٫۵ - ۱٫۳	۱٫۴ - ۱٫۱۵	۱٫۵	۱٫۲۵ - ۱٫۳۵	۱٫۷	۱٫۶
باد	۱٫۳	۱٫۵ - ۱٫۳	۱٫۳	۱٫۵	۱٫۴	۱٫۳	۱٫۳
زلزله	۱	۱	۱٫۳	۱	۱	۱٫۴	۱

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

آیین‌نامه‌های (۱۹۹۸) AASHTO، (۱۹۹۹) ACI، (۱۹۹۴) AISC، API<sup>۱۰</sup> (۱۹۹۳)، MOT<sup>۱۱</sup> (۱۹۹۲)، NRC<sup>۱۲</sup> (۱۹۹۵)، DGI<sup>۱۳</sup> (۱۹۸۵) و ECS<sup>۱۴</sup> (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 مقایسه‌ی 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]



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<sup>۷</sup> 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<sup>۸</sup> استفاده از این روش را در طراحی پی‌های سطحی توصیه می‌کند. آیین‌نامه‌ی AASHTO<sup>۹</sup> (۱۹۹۴) ضرایب بار جهت ترکیب بار و کاهش مقاومت ارائه می‌دهد، که مشابه ضرایب بار در طراحی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۲]

قبل از آنکه مقایسه‌ی 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 سازه‌ی یا ژئوتکنیکی را دچار مشکل کند. به‌طور کلی حالات حدی را می‌توان به ۲ گروه تقسیم کرد:

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

## ۲. آیین‌نامه‌ی API

مؤسسه نفت آمریکا توصیه‌هایی را برای طراحی شمع‌ها تحت بار محوری در نشریه‌ی API RP ۲A با عنوان «توصیه‌های عملی برای طراحی و ساخت سکوه‌های دریایی»<sup>۱۵</sup> 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 لوله‌ی فولادی توخالی با نوک باز استفاده می‌شود، که با استفاده از چکش در لایه‌های بستر دریا کوبیده می‌شوند.

## ۱.۲. طراحی محوری شمع براساس روش تنش مجاز

### (API RP ۲A-WSD)

با داشتن مقادیر مقاومت زهکشی‌نشده (Su) در خاک‌های چسبیده و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ( $\varphi$ )، آیین‌نامه‌ی API در خاک‌های غیرچسبیده، روش تنش مجاز را جهت ارزیابی ظرفیت شمع ارائه کرده است. جهت محاسبه‌ی اصطکاک واحد طول جداره ( $f_s$ ) در خاک‌های چسبیده از رابطه‌ی ۳ الی ۵ استفاده

جدول ۳. ضرایب اطمینان. [۵]

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

### 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. حاصل ضرب ضریب کاهش مقاومت در شرایط محیطی شدید ( $\phi_{PE} = 0.8$ ) 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):

$$P_{DE} < \phi_{PE} Q_D \quad (8)$$

۲. حاصل ضرب ضریب مقاومت در شرایط بهره‌برداری ( $\phi_{PO} = 0.7$ ) در مقاومت نهایی شمع، از مقدار بار در شرایط محیطی بهره‌برداری بیشتر باشد (رابطه‌ی ۹):

$$P_{DO} < \phi_{PO} Q_D \quad (9)$$

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

$$Q = 1.3D_1 + 1.3D_2 + 1.5L_1 + 1.5L_2 \quad (10)$$

که در آن،  $D_1$  وزن خود سازه،  $D_2$  وزن اعمال شده توسط سکو و تجهیزات آن،  $L_1$  بار زنده ناشی از سیال درون لوله‌های انتقال، و در نهایت،  $L_2$  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:

$$Q = 1.1D_1 + 1.1D_2 + 1.1L_1 + 1.35W_e \quad (11)$$

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:

$$Q = 1.3D_1 + 1.3D_2 + 1.5L_1 + 1.5L_2 + 1.2W_e \quad (12)$$

### ۳. استاندارد Eurocode

استاندارد Eurocode، مجموعه‌ی آیین‌نامه‌های اروپایی برای طراحی‌های سازه‌ی و ژئوتکنیکی است، که خود شامل ۱۰ سری استاندارد است، که استاندارد هفتم آن

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

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

می‌شود: [۳]

$$f_s = \alpha C_u \quad (3)$$

$$\alpha = 0.5 \Psi^{-1.25} \quad \Psi \geq 1 \quad (4)$$

$$\alpha = 0.5 \Psi^{-0.5} \quad \Psi \leq 1 \quad (5)$$

که در آنها،  $\alpha \leq 1$  و  $\Psi = \frac{C_u}{p_c}$  است و  $p_c$  تنش مؤثر قائم و  $C_u$  مقاومت برشی زهکشی‌نشده‌ی خاک در تراز موردنظر است. [۳] محاسبه‌ی اصطکاک واحد طول جداره ( $f_s$ ) در خاک‌های غیرچسبیده مطابق رابطه‌ی ۶ است: [۳]

$$f_s = K * P_o * \tan \delta \quad (6)$$

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  $K = 0.8$  باشد و همچنین برای شمع‌های با تغییرمکان زیاد (خاک محبوس شده یا نوک بسته)  $K = 1$  در نظر گرفته شود.  $\delta$  زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و جداره‌ی شمع است، که از جدول ۲ به دست می‌آید. [۳]

همچنین به منظور محاسبه‌ی مقاومت نوک در خاک‌های چسبیده از رابطه‌ی  $q = 9C_u$  و در خاک‌های غیرچسبیده از رابطه‌ی  $q = N_q P_o$  استفاده می‌شود،  $N_q$  ضریب بی‌بعدی است که مطابق جدول ۲ تعیین می‌شود. [۳]

در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، با مقایسه‌ی روش ذکرشده برای خاک‌های غیرچسبیده 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 شل را بیش از واقعیت پیش‌بینی می‌کند. [۳] در نهایت، مقاومت نهایی از مجموع مقاومت جداره و نوک حاصل می‌شود (رابطه‌ی ۷): [۳]

$$Q = f_s A_s + q A_t \quad (7)$$

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

جدول ۴. ضرایب همبستگی [۶]

۱۰	۷	۵	۴	۳	۲	۱	ξ for n =
۱٫۲۵	۱٫۲۷	۱٫۲۹	۱٫۳۱	۱٫۳۳	۱٫۳۵	۱٫۴	ξ <sub>۲</sub>
۱٫۰۸	۱٫۱۲	۱٫۱۵	۱٫۲	۱٫۲۳	۱٫۲۷	۱٫۴	ξ <sub>۲</sub>

یابد (رابطه‌ی ۱۶): [۸]

$$F_d = \gamma_F * F_k \quad (۱۶)$$

مقادیر  $\gamma_F$  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<sup>۱۶</sup> پیشنهاد می‌کند (DA-۱، DA-۲، DA-۳) تفاوت اصلی این رویکردها در نحوه‌ی اعمال ضرایب است.

در روش اول و دوم، مقاومت مشخصه براساس تعداد گمانه‌ها و ضریب  $\xi$  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. در نهایت، شرط آنکه طراحی شمع مورد قبول باشد، مطابق رابطه‌ی ۱۷ است: [۸]

$$F_d \leq R_d \quad (۱۷)$$

#### 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. خلاصه‌ی پیرامون محدودیت‌های هر کدام 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 غیرچسبیده، با استفاده از رابطه‌ی ۱۸ ظرفیت نوک شمع محاسبه می‌شود: [۹]

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

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 غیرچسبیده از رابطه‌ی ۱۹ استفاده می‌شود: [۹]

$$q_s = \beta \sigma'_v \quad (۱۹)$$

که در آن،  $\sigma'_v$  تنش مؤثر در عمق موردنظر و  $\beta$  ضریبی است که از جدول ۹ قابل تعیین است.

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

(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  $\xi$  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 حفار شده برای به دست آوردن 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 به صورت 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، بالآمدگی 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  $\varphi$  برای خاکی که خصوصیات آن با حفاری گمانه به دست می‌آید، محاسبه می‌شود. سپس از مقادیر مقاومت به دست آمده، مقدار میانگین و کمینه تعیین می‌شود. همچنین براساس تعداد گمانه‌ها، ضریب همبستگی  $\xi$  از جدول ۴ استخراج و سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱۳، مقاومت مشخصه تعیین می‌شود: [۸]

$$R_k = \text{Min}\{R_{cal,mean}/\xi_2; R_{cal,min}/\xi_2\} \quad (۱۳)$$

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

$$R_d = R_k/\gamma_t \quad (۱۴)$$

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]

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

که در روابط ۱۴ و ۱۵،  $\gamma_t$ ،  $\gamma_s$  و  $\gamma_b$  ضرایب اطمینان جزئی هستند، که مقادیر آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین با اعمال ضریب، بار وارده باید افزایش

جدول ۵. ضریب اطمینان جزئی. [۸]

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

\* Continuous Flight Auger Cast (CFA)

جدول ۶. ضرایب بار. [۸]

نوع بار	رویکرد ۱	رویکرد ۲	رویکرد ۳	رویکرد ۴
دائمی	۱-۱	۱-۲	۲	۳
نامساعد $\gamma_G$	۱٫۳۵	۱	۱٫۳۵	۱٫۳۵
مساعد $\gamma_G$	۱	۱	۱	۱
متغیر				
نامساعد $\gamma_Q$	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵
مساعد $\gamma_Q$	۰	۰	۰	۰

جدول ۷. ضرایب اطمینان جزئی. [۸]

پارامتر خاک	نماد ضرایب اطمینان جزئی	مقادیر
تانژانت زاویه اصطکاک داخلی	$\gamma_\phi$	۱٫۲۵
چسبندگی	$\gamma_C$	۱٫۲۵
مقاومت زهکشی نشده	$\gamma_{Cu}$	۱٫۴
مقاومت محصور نشده	$\gamma_{qu}$	۱٫۴

جدول ۸. مقادیر  $N_t$  در آیین نامه‌ی 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  $\beta$  در آیین نامه‌ی 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. برای اساس، آیین نامه‌ی 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 زهکشی نشده استفاده می‌شده است. اما در شرایطی که مقاومت برشی زهکشی نشده ( $C_u$ ) از حدود ۲۵ کیلوپاسکال بیشتر شود، صحت این روش به اثبات نرسیده است. بنابراین طراحی براساس روش تنش مؤثر، که برای خاک‌های دانه‌بی به کار می‌رود، منطقی‌تر به نظر می‌رسد. آیین نامه‌ی مذکور، این مقادیر را برای ضرایب  $N_t$  و  $\beta$  بر مبنای تحلیل تنش مؤثر در خاک‌های رسی به نقل از Skempton (۱۹۷۳) و Burland (۱۹۵۱) و Ladaniy (۱۹۶۳) ارائه کرده است (روابط ۲۰ و ۲۱): [۹]

$$\beta = 0.25 - 0.32 \quad (20)$$

$$N_t = 3 - 10 \quad (21)$$

همچنین آیین نامه‌ی کانادا بیان می‌کند برای شمع‌های کوبیده شده در خاک‌های رسی با  $C_u \leq 100 \text{ kPa}$  می‌توان از روش  $\alpha$  جهت محاسبه‌ی مقاومت جداره استفاده کرد. اما برای خاک‌های با  $C_u \geq 100 \text{ kPa}$ ، 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

### ۵.۱. مقایسه‌ی روش WSD و LRFD در آیین نامه‌ی API

برای نشان دادن تفاوت‌های موجود بین دو روش WSD و LRFD، عمق نفوذ مورد نیاز شمعی که در خاک با مشخصات جدول ۱۰ قرار می‌گیرد، از روش محاسبه شده است. مقطع شمع، به صورت لوله‌یی با قطر خارجی ۶۱۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۹ میلی‌متر است. با دو فرض خاک در انتهای شمع محبوس شده و محبوس نشده، 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 کیلو نیوتن، بار زنده ۶۰۰ کیلو نیوتن، و بار محیطی ۴۰۰ کیلو نیوتن است. در روش WSD، ضریب اطمینان ۱٫۵ فرض شده و بار طراحی برابر مجموع بارهای مرده، زنده، و محیطی، یعنی ۲۰۰۰ کیلو نیوتن

جدول ۱۰. پارامترهای خاک [۱۰]

عمق	نوع خاک	وزن مخصوص غوطه‌ور (kN/m <sup>3</sup> )	زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	مقاومت زهکشی نشده (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

جدول ۱۱. مقادیر مقاومت برشی زهکشی نشده [۷]

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

## ۲.۵. مقایسه‌ی رویکردهای طراحی‌های ۱، ۲ و ۳ در استاندارد

### Eurocode و مقایسه‌ی آنها با روش WSD

هدف از این مثال، تعیین کافی بودن عمق نفوذ شمع در جاریز با قطر ۰٫۸ متر و طول ۱۸٫۵ متر در خاک رسی است. تعداد ۳ گمانه‌ی حفار شده و مقادیر مقاومت زهکشی نشده در هر گمانه در جدول ۱۱ ارائه شده است. بار وارده به شمع شامل ۶۰۰ کیلو نیوتن بار دائمی و ۳۰۰ کیلو نیوتن بار متغیر است [۷].

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

$$R = R_s + R_b = \pi B L \alpha C_{u,shaft} + (\pi B^2 / 4) * 9 C_{u,base} \quad (22)$$

$$R = 3479 * C_{u,shaft} + 475 * C_{u,base} \quad (23)$$

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

$$BH1 : R_{base} = 148 \text{ kN} \quad R_{shaft} = 1815 \text{ kN}$$

$$BH2 : R_{base} = 135 \text{ kN} \quad R_{shaft} = 1605 \text{ kN}$$

$$BH3 : R_{base} = 189 \text{ kN} \quad R_{shaft} = 1780 \text{ kN}$$

ضرایب همبستگی از جدول ۴ برای  $n = 3$  استخراج و مقاومت مشخصه‌ی نوک و جداره تعیین شده است (روابط ۲۴ و ۲۵): [۷]

$$R_{s,k} = \text{Min}\{R_{s,k,mean}/\xi_r; R_{s,k,min}/\xi_r\} = 1605/1,23 = 1305 \text{ kN} \quad (24)$$

$$R_{b,k} = \text{Min}\{R_{b,k,mean}/\xi_r; R_{b,k,min}/\xi_r\} = 135/1,23 = 110 \text{ kN} \quad (25)$$

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

$$R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 1305/1,7 + 110/1,25 = 1393 \text{ kN} \quad (26)$$

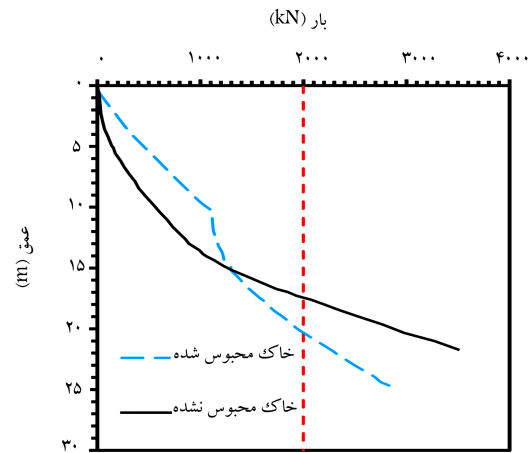
$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = 1,35 * 600 + 1,5 * 300 = 1260 \text{ kN} \\ F_d \leq R_d \rightarrow 1260 \leq 1393 \quad (27)$$

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

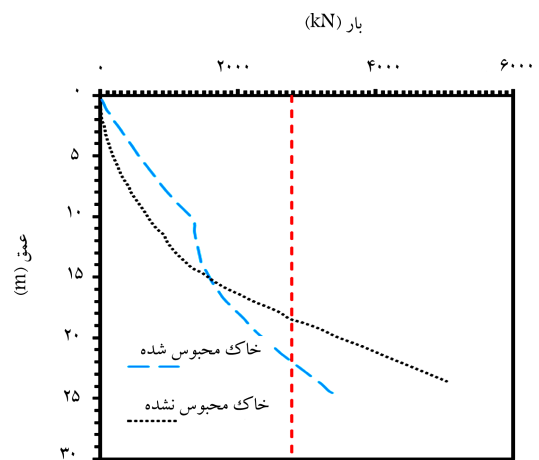
$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = 1 * 600 + 1,3 * 300 = 990 \text{ kN} \quad (28)$$

$$R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 135/1,3 + 110/1,6 = 1073 \text{ kN} \\ F_d \leq R_d \rightarrow 990 \leq 1073 \quad (29)$$

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



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 ( $\phi$ )، ۰٫۸ لحاظ شده است. [۱۰]

در شکل‌های ۲ و ۳، بار طراحی با خط چین نشان داده شده و ظرفیت باربری با هر دو فرض خاک محبوس شده و خاک محبوس نشده 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]

-- رویکرد ۲ (روابط ۳۰ و ۳۱):

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = 1,35 * 600 + 1,5 * 300 = 1260 \text{ kN} \quad (30)$$

$$R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 1305/1,1 + 110/1,1 = 1286 \text{ kN} \quad (31)$$

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

-- رویکرد ۳ (رابطه ۳۲):

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = 1,35 * 600 + 1,5 * 300 = 1260 \text{ kN} \quad (32)$$

در این رویکرد، ابتدا مقادیر مشخصه  $C_u$  برای جداره و نوک شمع براساس روش‌های آماری مزبور در فصل دوم از منبع<sup>[۷]</sup> تعیین می‌شود:

$$C_{u,k,base} = 32 \text{ kPa}$$

$$C_{u,k,shaft} = 47 \text{ kPa}$$

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

$$C_{u,d,base} = 32/1,4 = 22,9 \text{ kPa}$$

$$C_{u,d,shaft} = 47/1,4 = 33,6 \text{ kPa}$$

$$R_d = 34,9 * C_{u,d,shaft} + 4,5 * C_{u,d,base} = 1640 + 144 = 1276 \text{ kN}$$

طبق رویکرد ۳، شمع با طول ۱۸/۵ متر به صورت بهینه جوابگوی بار وارده است.<sup>[۷]</sup>

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.<sup>[۱۱]</sup> همچنین ابراهیم و همکاران (۲۰۱۳) از انجام مطالعه‌ی موردی بر روی شمع‌های مورد نیاز برای پروژه‌ی ساختمان‌های سنت 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.<sup>[۱۲]</sup>

### 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.<sup>[۱۳]</sup>

## ۶. آیین‌نامه‌های دیگر

از آیین‌نامه‌های معتبر دیگری که می‌توانند در طراحی شمع مورد استفاده قرار گیرند، 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.<sup>[۱۴]</sup>

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 همان 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 به صورت 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  $\xi$  است. در واقع، این ضرایب اثر تعداد گمانه‌های حفار شده 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 به دست می‌دهند. در مثال مطرح‌شده، رویکرد سوم نتایج محافظه‌کارانه‌تری به دست می‌دهد،

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.

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، بازه‌ی اعداد را برای ضرایب  $N_t$  و  $\beta$  مطرح می‌کند و طراح باید

### 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., Kavvas, 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).