

## تحلیل ظرفیت باربری شمع‌های دریایی در خلیج فارس با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط و بررسی اثر زمان

مقاله علمی - پژوهشی

امیرحسین شمشیرگران، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
بابک ابراهیمیان\*، استادیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [b\\_brahimian@sbu.ac.ir](mailto:b_brahimian@sbu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۲۹۷-۳۲۶

### چکیده

شمع‌های لوله‌ای فولادی به‌عنوان شالوده سازه‌های دریایی مانند پل‌ها، سکوها، استخراج مواد هیدروکربوری، توربین‌های بادی و امان‌های مہاری استفاده می‌شوند. با توجه به اهمیت و هزینه ساخت بسیار بالای این سازه‌ها، هرگونه ضعف و گسیختگی در شالوده‌های شمعی آن‌ها می‌تواند منجر به بروز خسارت‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی فاجعه‌بار گردد. از این رو، تحلیل دقیق، طراحی ایمن و تعیین مطمئن ظرفیت باربری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه، ظرفیت باربری محوری فشاری ۲۴ شمع طولی لوله‌ای فولادی کوبشی فراساحلی در رسوبات اغلب چسبنده منطقه خلیج فارس با استفاده از ۱۰ روش مبتنی بر به‌کارگیری نتایج مستقیم آزمایش نفوذ مخروط (CPT و CPTu) و ۵ روش مبتنی بر تحلیل استاتیکی تخمین زده می‌شوند. مقادیر ظرفیت باربری به‌دست آمده از این روش‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده متناظر حاصل از آزمون‌های تحلیل دینامیکی شمع مقایسه و اعتبارسنجی می‌شوند. سپس، عملکرد این روش‌ها از منظر دقت و کیفیت پیش‌بینی ظرفیت باربری به‌تفکیک جدار، نوک و کل بر اساس ۱۲ معیار آماری تحلیل می‌شوند. در ادامه، به تخمین زمان محتمل گیرش خاک پیرامون شمع‌های فراساحلی کوبیده شده در منطقه خلیج فارس با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی و همچنین روابط تجربی موجود در ادبیات فنی پرداخته می‌شود. نتایج بررسی‌ها در این زمینه مشخص می‌نمایند که شمع‌های نصب شده در منطقه مورد مطالعه، پس از حدود ۱۰۰ روز از کوبش اولیه بیش‌ترین رشد ظرفیت باربری را خواهند داشت و به ظرفیت باربری پیشینه یا بلندمدت خود می‌رسند.

واژه‌های کلیدی: شمع طولی دریایی، ظرفیت باربری، آزمون برجا، تحلیل آماری، اثر زمان، گیرش خاک، خلیج فارس

### ۱- مقدمه

و ضربات شناورها را به بستر دریا یا اقیانوس انتقال می‌دهند (Ebrahimian et al. 2017). محققان در طول ۶۰ سال گذشته، روابط متعددی برای محاسبه ظرفیت باربری جدار و نوک این شمع‌ها پیشنهاد داده‌اند. تحقیقات انجام شده در این زمینه حاکی از آن است که روابط ارائه شده پاسخ‌های بسیار متفاوتی در شرایط یکسان ارائه می‌دهند، که این مهم محققان را به سوی به‌گزینی این روش‌ها با توجه به مقایسه‌ی آنها با نتایج

به‌دلیل محدودیت‌های فیزیکی یا اقتصادی، وجود بارهای سنگین و کم بودن ظرفیت باربری لایه‌های سطحی بستر دریا، استفاده از شمع‌ها به‌عنوان شالوده سازه‌های دریایی مانند پل‌های حمل و نقل جاده‌ای و ریلی، سکوها، استخراج نفت و گاز، توربین‌های بادی و مهارهای کششی اجتناب‌ناپذیر است. این سازه‌ها بر روی شمع‌های عمدتاً فولادی کوبشی مستقر می‌شوند و بارهای حاصل از وزن سازه، جریان‌ها، امواج آب، جذر و مد، باد، زلزله

آزمایش‌های برجایی که برای تعیین مقاومت نهایی یک شمع به‌کار می‌روند عمدتاً شامل آزمایش‌های نفوذ استاندارد، نفوذ مخروط (CPT یا CPTu) و فشارسنج می‌باشند. دو آزمایش اول برای تعیین ظرفیت باربری محوری و آزمایش سوم برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها استفاده می‌شوند. دو روش مستقیم و غیرمستقیم بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های برجای فوق در تعیین توان باربری شمع‌ها متداول است. در روش مستقیم، نتایج حاصل از هر آزمایش مستقیماً در تعیین توان باربری جداره و نوک و به صورت روابط عموماً تجربی به‌کار گرفته می‌شوند. در صورتی که در روش‌های غیرمستقیم، ابتدا پارامترهای مقاومت برشی خاک مانند  $S_{II}$  و  $\phi$  از نتایج آزمایش‌های برجای به‌دست می‌آیند و سپس بقیه روند تعیین توان باربری شمع با روش‌های تحلیل استاتیکی تعقیب می‌شود (Briaud and Tucker. 1988 - Lunne, Powell and Robertson. 2002).

در بخش آزمون‌های برجای، امروزه آزمون نفوذ مخروط (CPT) به‌دلایلی همچون دقت، تکرارپذیری و سرعت قابل توجه، شباهت به شمع تحت بار محوری، تولید اطلاعات پیوسته‌ای از لایه‌بندی خاک، وجود زمینه خوب برای تفسیر نتایج آزمایش و گسترش آن در طی سالیان اخیر به‌عنوان موثرترین و معتبرترین آزمایش برجای برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در خشکی و به‌ویژه فراساحل و به‌عنوان یک روش مکمل و جایگزین روش‌های تحلیل استاتیکی، مورد توجه قرار گرفته است (Ebrahimian and Shamshirgaran. 2018 - Niazi and Mayne. 2013).

عمدتاً آنچه در تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها خصوصاً در محیط‌های چسبنده مد نظر قرار می‌گیرد، ظرفیت باربری بهره‌برداری آنهاست که متضمن رفتار بلند مدت شمع‌هاست (Haustorfer and Plesiotis. 1988 - Fakharian et al. 2012). درحالی‌که آزمایش برجای CPT از تحلیل تنش کل در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده می‌کند و تحلیل تنش کل مربوط به بررسی رفتار شمع‌ها در کوتاه مدت است و تحلیل تنش مؤثر مربوط به بررسی رفتار شمع‌ها در بلند مدت می‌باشد. اثر اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک‌های غیرچسبنده مانند ماسه قابل صرف‌نظر کردن است چرا که هم مقدارش اندک است و هم به‌سرعت زائل می‌شود. اما در خاک‌های چسبنده مانند رس و سیلت که اضافه فشار آب حفره‌ای به‌سرعت مستهلک نمی‌شود، بایستی حتماً محاسبه ظرفیت باربری بلند مدت مدنظر قرار گیرد

حاصل از آزمایش‌های مرجع نظیر بارگذاری استاتیکی و دینامیکی رهنمون می‌سازد (Ebrahimian et al. 2015).

عمدتاً روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها به چهار دسته مختلف شامل تحلیل استاتیکی، استفاده از نتایج آزمون‌های برجای، آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شوند (Eslami et al. 2011).

روش‌های تحلیل استاتیکی، ظرفیت باربری شمع‌ها را با استفاده از مشخصات مکانیکی خاک محل اجرای شمع و تحلیل‌های تئوریک رایج در مکانیک خاک تخمین می‌زنند. هر چند، تحلیل استاتیکی به‌عنوان رایج‌ترین روش تحلیل و طراحی شمع‌ها شناخته می‌شود اما به‌دلیل ساده‌سازی‌های صورت گرفته، انتخاب ضریب اطمینان‌های بزرگ‌تر در آن امری اجتناب‌ناپذیر است. این مسئله باعث دقت پایین‌تر و اتلاف بیش‌تر در منابع در این دسته از روش‌ها می‌شود (Titi, Abu-Farsakh and Tumay. 1999).

تحقیقات وانگ و همکاران (۲۰۱۷)، ابوفرسخ و تی تی (۲۰۰۴) و تاند و فونگراد (۱۹۸۹) بیانگر آن است که استفاده از روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها مبتنی بر روش‌های تحلیل استاتیکی پاسخ‌های بسیار متفاوتی را نشان می‌دهند و قابل اطمینان نیستند (Wang et al. 2017 – Titi and Abu-Farsakh. 2004 - Tand and Funegard. 1989). بر اساس یافته‌های حاصل از پژوهش شمشیرگران و ابراهیمیان (۱۳۹۹)، مقادیر ظرفیت باربری کل به‌دست آمده از روش‌های تحلیل استاتیکی به‌طور میانگین ۷۰٪، ۶۳٪ و ۳۵٪ بیش‌تر از مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده حاصل از آزمون‌های دینامیکی شمع به‌ترتیب در سه زمان کوتاه، میان و بلند مدت می‌باشند (شمشیرگران و ابراهیمیان، ۱۳۹۹). در نتیجه، ارایی روش یا روش‌های مکمل برای کنترل و محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها با هدف طراحی اقتصادی‌تر شمع‌ها ضرورت می‌یابد. در این راستا، امروزه استفاده از نتایج آزمون‌های برجای در طراحی شمع‌ها گسترش چشم‌گیری یافته است. دلایل اصلی آن را می‌توان در عدم توانایی محققان در شبیه‌سازی دقیق و واقعی شرایط جانبی و مرزی برای نمونه‌های آزمایشگاهی در مقایسه با حالت برجای، مشکلات نمونه‌گیری صحیح به‌خصوص اخذ نمونه‌های دست‌نخورده در خاک‌های دانه‌ای و نیز توسعه و پیشرفت‌های امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی که توأم با ایده حمل دستگاه آزمایش به محل به‌جای آوردن نمونه‌های کوچک خاک به آزمایشگاه است، برشمرد (Lunne, Powell and Robertson. 2002).

است و در بعضی موارد مانند سازه‌های فراساحلی، فراهم آوردن شرایط لازم برای انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی غیرممکن به نظر می‌رسد (ASTM D1143. 2020).

آزمایش تحلیل دینامیکی روش نسبتاً جدیدی در تعیین ظرفیت باربری شمع است که به کمک اندازه‌گیری پارامترهای لازم در حین فرو رفت شمع در زمین، می‌تواند ظرفیت باربری شمع‌ها را محاسبه نماید. در این روش، نمودارهای سرعت و نیروی اندازه‌گیری شده در محل به وسیله دستگاه PDA با مقادیر سرعت و نیروی محاسباتی از روش CAPWAP منطبق می‌شوند تا بدین ترتیب اطلاعات کامل‌تری از شمع نظیر تفکیک مقاومت‌های نوک و اصطکاک جدار، اندازه و توزیع مقاومت اصطکاکی روی جدار و توزیع نیروی محوری در شمع به دست آیند. امروزه، آزمایش‌های تحلیل دینامیکی نیز به‌عنوان یک روش اقتصادی و سریع و جایگزین آزمایش بارگذاری شمع به‌ویژه در محیط‌های فراساحلی مورد توجه‌اند (Rausche, Goble and Likins. 1985). اسلامی و همکاران (۲۰۱۱) با مطالعه بر روی رس‌های بستر دریاچه ارومیه بیان کرده‌اند که ترکیب استفاده از نتایج دستگاه نفوذسنج الکتریکی (CPTu) و آزمایش تحلیل دینامیکی، مناسب‌ترین روش برای پیش‌بینی ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در محیط‌های فراساحلی است (Eslami et al. 2011). فاخر و همکاران (۱۳۸۷) با بررسی نتایج ظرفیت باربری شمع حاصل از اندازه‌گیری‌های دینامیکی با استفاده از روش PDA در بنادر خدماتی و پتروشیمی عسلویه در خلیج فارس به این مهم دست یافته‌اند که نتایج آزمون دینامیکی شمع با استفاده از PDA برای تعیین ظرفیت باربری کلی شمع اطمینان بخش است، اما برای تخمین سایر متغیرها مانند متغیرهای مربوط به رفتار خاک دقت کافی ندارد (فاخر و همکاران، ۱۳۸۷). از آزمایش‌های بارگذاری و تحلیل دینامیکی شمع به‌عنوان آزمایش‌های کنترل (محک، مرجع یا پایه) برای ارزیابی و افزایش سطح دقت روش‌های تحلیل استاتیکی و آزمایش‌های برجا در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده می‌شود (Niazi. 2014). البته، این آزمایش‌ها صرفاً مقاومت حاضر شمع را اندازه‌گیری می‌کنند و به علت تغییر ظرفیت باربری شمع در طول زمان به‌ویژه در خاک‌های چسبنده، ایده‌ای از ظرفیت باربری بلندمدت شمع (هنگام بهره‌برداری از سازه) ارائه نمی‌دهند. یکی از عواملی که باعث افزایش ظرفیت باربری شمع در خاک‌های رسی می‌شود، پدیده گیرش خاک است. این پدیده در طول زمان در اثر تغییر و تحولات خاک اطراف شمع

(Augustesen. 2006 - Cai, Liu and Puppala. 2012).

در اوایل دهه ۱۹۸۰، مخروط نفوذسنج الکتریکی (CPTu) که قادر به اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای همزمان با نفوذ مخروط دستگاه CPT بود، ارائه شد. پیش‌بینی می‌شد که این تغییر اساسی در آزمایش نفوذ مخروط می‌تواند راه‌گشا اصلی ایراد واقع بر آزمایش برجا CPT در تخمین رفتار بلند مدت شمع‌ها باشد. بنابراین، تحقیقات گسترده‌ای بر روی این آزمایش آغاز شد. اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷) اولین کسانی بودند که برای تعیین ظرفیت باربری بر اساس نتایج آزمایش نفوذ مخروط، یک رابطه جدید تعیین ظرفیت باربری براساس نتایج CPTu ارائه کردند (Eslami and Fellenius. 1997). روند کار این پژوهشگران در سال‌های بعد مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفت. ابراهیمیان و شمشیرگران (۲۰۱۹) با مطالعه موردی بر روی ۴ شمع کوبیده شده در دریاچه ارومیه و خلیج توکیو به این مهم دست یافته‌اند که روش‌های مبتنی بر نفوذسنج الکتریکی (CPTu) از قابلیت اطمینان بهتری نسبت به روش‌های مبتنی بر نفوذسنج مکانیکی (CPT) در محیط‌های دریایی برخوردارند (Ebrahimian and Shamsirgaran. 2019).

آزمایش نفوذ مخروط با توجه به استاندارد ASTM D3441 (برای سیستم‌های مکانیکی یا CPT) و ASTM D5778 (برای سیستم‌های الکتریکی یا CPTu) انجام می‌شود و شامل فرستادن میله‌ای استوانه‌ای فولادی با نرخ ثابت ۲۰ میلیمتر بر ثانیه به‌داخل زمین و اندازه‌گیری مقاومت نفوذی (جدار+نوک) می‌باشد (ASTM - ASTM D3441. 2016 - D5778. 2020).

در طول نیم قرن گذشته تا به امروز، روش‌های متعددی برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از تحلیل استاتیکی و نتایج مبتنی بر آزمایش نفوذ مخروط ارائه شده‌اند. مجموعه‌ای کامل از این روش‌ها توسط نیازی (۲۰۱۴) گردآوری شده‌اند (Niazi, 2014). اساس کار این روش‌ها عمدتاً بر پایه روابط تجربی و تحلیلی است که عوامل مختلفی از قبیل نوع خاک، روش اجرا، جنس و ابعاد شمع را در طراحی‌ها مورد ملاحظه قرار داده‌اند (Almeida, Danziger and Lunne. 1996 - Lacasse et al. 2013).

انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع (SPLT) در محل، مطابق با استاندارد ASTM D1143، همواره به منزله‌ی معتبرترین و کامل‌ترین روش برای تعیین ظرفیت باربری شمع در نظر گرفته می‌شود. اما این روش بسیار پرهزینه و زمان‌بر

## ۲- منطقه مورد مطالعه

شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تمامی داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از خاک‌های اغلب رسی منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی در حدفاصل سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ استخراج شده‌اند (Ebrahimiyan, Movahed and Pasha. 2012 - ) (Ebrahimiyan, Movahed and Nazari. 2014).

### ۲-۱- اطلاعات مربوط به شمع‌ها و گمانه‌ها

در این تحقیق، ۲۴ شمع فلزی کوبیده شده در مجاورت ۱۰ گمانه در منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی بررسی می‌شوند. تمامی شمع‌ها از نوع لوله‌ای فولادی با انتهای باز هستند و نحوه نصب و اجرای آنها از نوع کوبشی است. خلاصه‌ای از مشخصات هندسی شمع‌های کوبشی در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ گردآوری شده است. برای هر یک از شمع‌ها و گمانه‌های مورد مطالعه، به ترتیب یک شناسه تحت عنوان TP و BH در نظر گرفته می‌شود که مخفف کلمات "Test Pile" و "Borehole" هستند.

هر شناسه از دو بخش تشکیل شده است که با استفاده از یک خط تیره (-) از یکدیگر جدا شده‌اند. بخش اول شامل کلمه دو حرفی TP یا BH است. بخش دوم هر شناسه شامل یک عدد دو رقمی بین ۰۱ تا ۲۴ برای شمع‌ها و بین ۰۱ تا ۱۰ برای گمانه‌ها می‌باشند. ترتیب اعداد در شمع‌ها براساس تاریخ و ساعت کوبش، طبقه‌بندی شده‌اند.



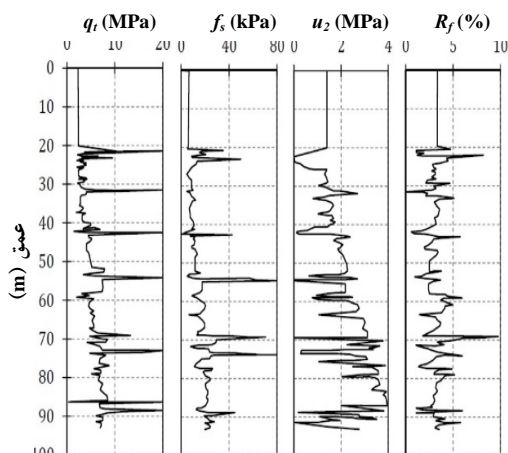
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

که شرایط آن بر اثر کوبش کاملاً به هم خورده است، رخ می‌دهد. برای تعیین میزان گیرش خاک لازم است آزمایش‌های کنترلی حداقل در دو زمان (بلافاصله بعد از کوبش و بیش‌ترین زمان ممکن بعد از کوبش) انجام شوند. هرچند، انجام آزمایش‌های کنترلی در فواصل زمانی طولانی پس از نصب شمع، با توجه به شرایط حاکم بر محیط‌های فراساحل عملی و اقتصادی نمی‌باشد (Fakharian et al. 2012). به همین دلیل، عموماً اطلاعات مربوط به نتایج آزمایش‌های تحلیل دینامیکی شمع‌های فراساحلی در بلند مدت بسیار کمیاب هستند و به راحتی در دسترس نیستند. در کنار میزان گیرش، زمان گیرش خاک نیز فاکتور بسیار مهمی دیگری است. در واقع، پاسخ به این سوال که پس از چه زمانی، شمع کوبیده شده به ظرفیت باربری بیشینه یا بلندمدت خود می‌رسد، در بارگذاری و بهره‌برداری از آن بسیار حیاتی است. بنابراین، در بخش دوم این تحقیق تلاش می‌شود که به تخمین زمان گیرش خاک در منطقه خلیج فارس پرداخته شود. در این مطالعه، ابتدا ظرفیت باربری محوری فشاری ۲۴ شمع طویل لوله‌ای فولادی کوبشی فراساحلی در خاک‌های اغلب چسبنده منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی با به‌کارگیری ۱۰ روش مبتنی بر نتایج مستقیم آزمایش نفوذ مخروط (CPT و CPTu) و ۵ روش مبتنی بر تحلیل استاتیکی تخمین زده می‌شوند. سپس، نتایج این روش‌ها با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده حاصل از آزمایش‌های تحلیل دینامیکی شمع مقایسه و اعتبارسنجی می‌شوند. در ادامه، بر اساس ۱۲ معیار آماری، دقت و کیفیت پیش‌بینی ۱۵ روش در تعیین ظرفیت باربری به تفکیک جدار، نوک و کل مورد ارزیابی آماری قرار می‌گیرند. برای این منظور، از یک بانک داده جامع توسعه یافته شامل خصوصیات ژئوتکنیکی خاک حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا، نتایج آزمایش‌های دینامیکی شمع در بازه‌های زمانی مختلف و اطلاعات آزمون‌های CPTu انجام شده در مجاورت شمع‌ها در منطقه مورد بررسی استفاده می‌شود. گام مهم بعدی در این پژوهش، به تخمین زمان گیرش خاک در منطقه خلیج فارس با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی و همچنین روابط تجربی موجود در ادبیات فنی می‌پردازد.

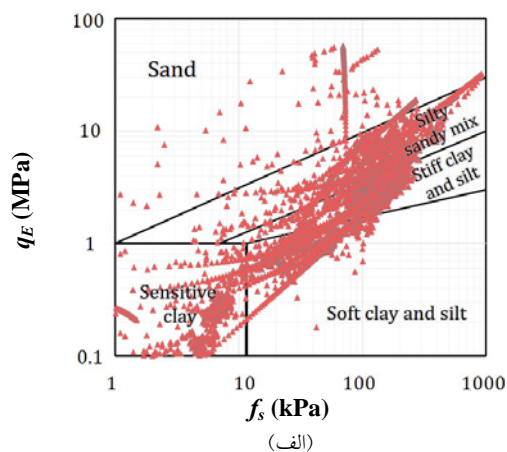
مطالعه در مجاورت گمانه‌های BH-01 تا BH-10 از جنس ریزدانه می‌باشند.

جدول ۱. مشخصات هندسی شمع‌های مورد مطالعه

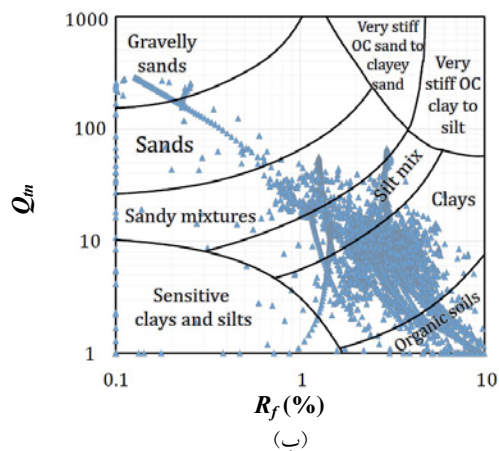
نام گمانه	نام شمع	L (m)	D (m)	t (mm)
BH-01	TP-01	۹۷/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-02	۱۰۱/۱۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-03	۱۰۱/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
BH-02	TP-04	۹۶/۴۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-05	۹۷/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-06	۱۰۶/۵۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-07	۱۰۷/۷۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
BH-03	TP-08	۱۰۶/۵۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-09	۱۰۷/۷۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
BH-04	TP-10	۶۵/۵۰	۱/۲۲۰	۵۰/۸۰
BH-05	TP-11	۹۴/۷۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-12	۱۰۱/۳۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-13	۹۴/۳۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-14	۱۰۲/۳۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
BH-06	TP-15	۸۳/۱۰	۰/۶۵۸	۱۷/۵۰
BH-07	TP-16	۸۵/۰۰	۰/۶۵۸	۱۷/۵۰
BH-08	TP-17	۶۳/۷۰	۱/۲۲۰	۳۸/۱۰
BH-09	TP-18	۶۴/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-19	۸۷/۲۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-20	۶۷/۵۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-21	۹۴/۸۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-22	۹۲/۸۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
	TP-23	۸۵/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰
BH-10	TP-24	۹۳/۰۰	۱/۵۲۴	۵۰/۸۰



شکل ۲. نتایج آزمایش نفوذ مخروط مربوط به شمع TP-16



(الف)



(ب)

شکل ۳. نمودار طبقه‌بندی خاک به دو روش: (الف) اسلامی و

فلینیوس (۲۰۰۴)، و (ب) رابرتسون (۲۰۰۹)

در مجاورت گمانه BH-03

### ۲-۲- نتایج آزمایش‌های نفوذ مخروط

در شکل ۲، یک نمونه نتایج مربوط به آزمایش نفوذ مخروط شامل تنش اصلاح شده نوک مخروط ( $q_t$ )، فشار آب حفره‌ای ( $u_2$ )، تنش جداره ( $f_s$ ) و ضریب اصطکاک ( $R_f$ ) در برابر عمق نشان داده شده است.

### ۳-۲- اطلاعات مربوط به لایه‌بندی خاک

تا به امروز، محققان روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی لایه‌های خاک بر اساس نتایج آزمایش نفوذ مخروط الکتریکی با قابلیت اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای (CPTu) ارایه کرده‌اند. در این تحقیق، از دو روش روش اسلامی و فلینیوس (۲۰۰۴) و رابرتسون (۲۰۰۹) برای طبقه‌بندی خاک با استفاده از نتایج آزمایش CPTu استفاده شده است (Eslami and Fellenius. 2004 – Robertson. 2009). در شکل ۳، جنس لایه‌های خاک به کمک دو روش مذکور تقسیم‌بندی و بر روی گراف‌های مورد نظر در مجاورت گمانه BH-03 ترسیم شده‌اند. براساس این دو روش، بیش از ۹۵٪ خاک‌های مورد

### ۳- محاسبه ظرفیت باربری محوری فشاری شمع

بارگذاری روی شمع را می‌توان به دو دسته بارهای محوری و بارهای جانبی تقسیم نمود. بارهای محوری از نوع بارهای فشاری یا کششی هستند که به موازات محور طولی شمع قائم وارد می‌شود و در سازه شمع موجب ایجاد فشار و یا کشش می‌شوند ولی خمش و برش را در برنارداند. به‌طور کلی ظرفیت باربری فشاری محوری شمع‌ها را می‌توان برابر با مجموع ظرفیت باربری جدار و نوک در نظر گرفت که توسط معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_U = Q_s + Q_b = P_{out} \int q_s dz + q_b A_b \quad (1)$$

که در آن،  $Q_s$  مقاومت جدار خارجی شمع،  $Q_b$  مقاومت نوک شمع،  $q_s$  مقاومت واحد جدار شمع،  $q_b$  مقاومت واحد نوک شمع،  $P_{out}$  محیط خارجی شمع و  $A_b$  سطح مقطع شمع هستند. در این پژوهش، ۵ روش فراساحلی تحلیل استاتیکی شامل روش‌های مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)، فلمینگ (۱۹۹۲)، کلک و ولد (۱۹۹۶)، یاردین و همکاران (۲۰۰۵) و کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)، ۸ روش تعیین ظرفیت باربری با استفاده مستقیم از نتایج آزمایش CPT شامل آتوکی و ولسو (۱۹۷۵)، کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)، اشمرتمن (۱۹۷۸)، دیروتر و

برینجن (۱۹۷۹)، فیلیونات (۱۹۸۰)، تومای و فخرو (۱۹۸۲)، بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) و پرایس و واردل (۱۹۸۲) و ۲ روش نیز بر پایه به‌کارگیری مستقیم نتایج آزمایش CPT شامل اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷) و نیازی و ماین (۲۰۱۶) انتخاب شده‌اند (Niazi, 2014). خلاصه‌ای از معادلات حاکم بر روش‌های مورد اشاره در محیط‌های رسی و ماسه‌ای در جدول ۲ نشان داده شده است. برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها، مقادیر مقاومت واحد جدار و نوک شمع ( $q_s$  و  $q_b$ ) مطابق هر یک از ۱۵ روش برده به‌دست می‌آیند و همراه با مشخصات فیزیکی شمع‌ها در رابطه ۱ جای‌گذاری می‌شوند. نکته مهمی که برای شمع‌های لوله‌ای ته‌باز باید مد نظر قرار داد، این است که ظرفیت باربری نوک این شمع‌ها، کمترین میزان مقاومت نوک با فرض ته‌بسته بودن نوک شمع (مقاومت نوک شمع با سطح مقطع دایره‌ای با قطر خارجی لوله) و فرض ته‌باز بودن (مقاومت اصطکاکی جدار داخلی شمع + مقاومت نوک شمع با سطح مقطع لوله‌ای) در نظر گرفته می‌شوند. روابط مربوط به محاسبه ظرفیت باربری شمع برای هر یک از روش‌ها و همچنین روابط میانگین‌گیری مورد نیاز برای محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع مربوط به روش‌های مورد استفاده در این پژوهش، در نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده‌اند.

جدول ۲. خلاصه معادلات روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع (Niazi, 2014)

معادلات طراحی		نوع روش	روش
مقاومت واحد نوک، $q_b$	مقاومت واحد جدار، $q_s$	روش	
<p>در رس:</p> $q_b = N_c S_u$ $N_c = 9$ <p>در ماسه:</p> $q_b = N_q \sigma'_{v0}$ $N_q \text{ depending on soil type}$	<p>در رس:</p> $q_s = \alpha S_u$ $\psi = S_u / \sigma'_{v0}$ <p>For <math>\psi \leq 1</math>:</p> $\alpha = 0.5 (S_u / \sigma'_{v0})^{-0.5}$ <p>For <math>\psi &gt; 1</math>:</p> $\alpha = 0.5 (S_u / \sigma'_{v0})^{-0.25}$ <p>در ماسه:</p> $q_s = \beta \sigma'_{v0}$ $\beta \text{ depending on soil type}$	Static	<p>مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)</p> <p>(روش API)</p>
<p>مشابه با مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)</p>	$q_s = \beta \sigma'_{v0} = \sigma'_{rf} \tan \delta'_f = [0.5 (1 + K_0) \sigma'_{v0}] \tan \delta'_f$ $\tan \delta'_f = C_M \tan \phi$ $C_M = 1.0 \text{ (rough surface); } 0.9 \text{ (smooth surface)}$	Static	فلمینگ (۱۹۹۲)
<p>مشابه با مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)</p>	$q_s = \alpha S_u$ $\alpha = (0.5 h/D)^{-0.2} (S_u / \sigma'_{v0})^{-0.3} \leq 1$	Static	کلک و ولد (۱۹۹۶) (روش فوگرو یا FBV)
<p>مشابه با مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)</p>	$q_s = \sigma'_{rf} \tan \delta'_f = (K_f / K_c) \sigma'_{rc} \tan \delta'_f$ $(K_f / K_c) = 0.8$ $K_c = [2.2 + 0.016 OCR - \log_{10} S_c] OCR^{0.42} \max[\frac{h}{r^*}, 8]^{-0.2}$ $r^* = (r_{ou}^2 - r_{in}^2)^2$	Static	یاردین و همکاران (۲۰۰۵) (روش ICP)

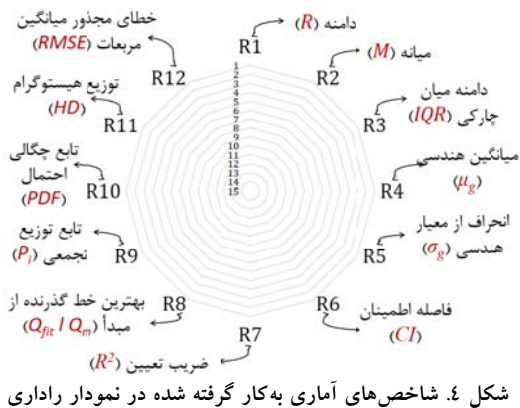
جدول ۲. (ادامه) (Niazi. 2014)

معادلات طراحی		نوع روش	روش
مقاومت واحد نوک، $q_b$	مقاومت واحد جدار، $q_s$	روش	
مشابه با مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)	For NC clays with $\psi < 0.25$ : $q_s = \alpha^{NC} \psi^{NC} \sigma_{v0}^{\prime}$ $\alpha^{NC} = 0.32 (I_p - 10)^{0.3}$ For OC clays with $\psi \geq 1$ : $q_s = \alpha S_u^{0.5} F_{tip}$ $F_{tip} = 1.0$ (OE piles) $F_{tip} = 0.8 + 0.2 \psi^{0.5}$ (CE piles) $1.00 < F_{tip(closed)} < 1.25$ For clays with $0.25 \leq \psi \leq 1.0$ : $q_s = \alpha S_u$ $\alpha = 0.5 + (0.83 - 1.66 \alpha^{NC}) \log_{10} \psi \leq 1.0$ $q_s$ should be $\geq \beta_{Min} \sigma_{v0}^{\prime}$ $\beta_{Min} = 0.06 (I_p - 12)^{0.33}$ $0.05 < \beta_{Min} < 0.20$	Static	کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵) (روش NGI)
$q_b = \frac{q_{cA}(tip)}{F_b} \leq 15 \text{ MPa}$	$q_s = \frac{q_c C_s}{F_s} \leq 120 \text{ kPa}$	CPT	آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)
$q_b = C_b q_{cA}(tip)$ $C_b$ depends on soil type: sand = 1.25 and clay = 0.25	$q_s = \frac{f_s}{(1.5 + 14.47 f_s)}$ $q_s$ and $f_s$ are expressed in MPa	CPT	کلیسی و همکاران (۱۹۷۸) (روش Penpile)
$q_b = C_b q_{cD}(tip) \leq 15 \text{ MPa}$ $C_b$ is governed by over-consolidation ratio: $0.5 \leq C_b \leq 1.0$ .	در رس: $q_s = C_s f_s \leq 120 \text{ kPa}$ $C_s = 0.2 - 1.25$ as a function of $f_s$ در ماسه: $q_s = C_s \left[ \sum_{z=0}^{8D} \frac{z}{8D} f_s + \sum_{z=8D}^L f_s \right] \leq 120 \text{ kPa}$ $C_s = 0.8 - 2.0$ as a function of $z/D$	CPT	اشمرتمن (۱۹۷۸)
در رس: $q_b = N_c s_u(tip) \leq 15 \text{ MPa}$ $N_c = 9$ $S_u = \frac{q_c(tip)}{N_k}$ $(15 \leq N_k \leq 20)$ در ماسه: مشابه با روش اشمرتمن (۱۹۷۸)	در رس: $q_s = C_s s_u(side) \leq 120 \text{ kPa}$ For NC clay: $C_s = 1.0$ For OC clay: $C_s = 0.5$ $S_u = \frac{q_c(side)}{N_k}$ $(15 \leq N_k \leq 20)$ در ماسه: $r_s = \text{Min} \left[ f_s \cdot \frac{q_c(side)}{b} \cdot 120 \text{ kPa} \right]$ $b = 300$ for compression, and = 400 for tension	CPT	دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹) (روش اروپایی یا Dutch)
$q_b = C_b q_{cA}(tip)$	$q_s = q_{c.avg} C_s / F_s < q_{smax}$ $C_s$ and $F_s$ depending on soil type, and installation procedures	CPT	فیلیپونات (۱۹۸۰)
مشابه با روش اشمرتمن (۱۹۷۸)	$q_s = C_s f_s \leq 72 \text{ kPa}$ $C_s = 0.5 + 9.5 e^{(-90 f_s)}$ $(f_s \text{ in MPa})$ $e = 2.718$	CPT	تومای و فخرو (۱۹۸۲) (روش Cone-m)
$q_b = C_b q_{cA}(tip)$ $C_b$ for non-displacement pile: clay and/or silt = 0.375; sand and/or gravel = 0.15; chalk = 0.20 $C_b$ for displacement pile: clay and/or silt = 0.60; sand and/or gravel = 0.375; sand and/or gravel = 0.40	$q_s = q_c / C_s < q_{smax}$ $C_s$ depending on soil type, pile type, and installation procedure: $30 \leq C_s \leq 150$	CPT	بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) (روش فرانسوی یا LCPC)
$q_b = C_b q_{c}(tip) \leq 15 \text{ MPa}$ $C_b$ depending on pile type: driven = 0.35; jacked = 0.30	$q_s = C_s f_s \leq 120 \text{ kPa}$ $C_s$ depending on pile type: driven = 0.53; jacked = 0.62; bored = 0.49	CPT	پرایس و واردل (۱۹۸۲)
$q_b = C_b q_{EG}(tip)$ $C_b$ for $D < 0.40 \text{ m} = 1.0$ $C_b$ for $D \geq 0.40 \text{ m} = \frac{1.0}{3D}$	$q_s = C_s q_E$ $q_E = q_t - u_2$ $q_t = q_c - (1 - a) u_2$ $C_s$ (%) depending on soil classification chart derived from $q_t$ , $f_s$ and $u_2$ : soft sensitive soils = 8.0; Clay = 5.0; stiff clay and clay/silt mix = 2.5; silt and sand mix = 1.0 and sand = 0.4	CPTu	اسلامی و فلیوس (۱۹۹۷) (روش Unicone یا EF)

جدول ۲. (ادامه) (Niazi, 2014)

معادلات طراحی		نوع	روش
مقاومت واحد نوک، $q_b$	مقاومت واحد جدار، $q_s$	روش	
$q_b = C_{be} q_{EG}$ - All SBT <sub>n</sub> Zones: $C_{be(mean)} = 10^{[0.325 (I_c) - 1.218]}$	$q_s = C_{se} q_E$ $C_{se} = \theta_1 \theta_2 \theta_3 C_{se(mean)}$ - SBT <sub>n</sub> Zone 1: $C_{se(mean)} = 0.074 - 0.004 [Q_{tm} - 12 e^{(-1.4 F_r)}]$ - SBT <sub>n</sub> Zones 2 to 9: $C_{se(mean)} = 10^{[0.732 (I_c) - 3.605]}$ $\theta_1$ depending on pile type: bored = 0.84; jacked = 1.02 and driven = 1.13 $\theta_2$ depending on load direction: compression = 1.11 and tension = 0.85 $\theta_3$ depending on loading rate: for $I_c \leq 2.6 = 1.0$ for $I_c > 2.6 = 0.97$ (stepped load), and 1.09 (constant rate of penetration)	CPTu	نیازی و ماین (۲۰۱۶) روش Enhanced Modified یا Unicone (Unicone)

پارامترهای آماری به کار گرفته شده در نمودار راداری نمایش داده شده‌اند.



شکل ۴. شاخص‌های آماری به کار گرفته شده در نمودار راداری

درصد مساحت اشغال شده توسط یک روش نسبت به مساحت کل نمودار، به عنوان نسبت مساحت معرفی می‌شود. به منظور تسهیل در مقایسه، روش‌هایی که عملکرد بهتری دارند، مقدار نسبت سطح  $(AR)$  برای آنها بیشتر و به عدد ۱۰۰ نزدیک‌تر است.

#### ۴-۱- دامنه، $R_1$

اختلاف بین بزرگترین داده و کوچکترین داده در یک توزیع مشخص، دامنه  $(R)$  آن توزیع (پارامترهای مدل) نام دارد. دامنه، نوعی سنجش پراکندگی است که تنها دو داده (بیشینه و کمینه) در آن نقش دارند. این پارامتر آماری عمدتاً تحت تأثیر داده‌های با پراکندگی زیاد قرار می‌گیرد و به تنهایی معیاری مناسبی برای سنجش پراکندگی نیست. هر قدر این

#### ۴- تحلیل نتایج حاصل از روش‌های مختلف تعیین

##### ظرفیت باربری شمع بر اساس معیارهای آماری

در این بخش، ابتدا نتایج ظرفیت باربری شمع‌ها حاصل از روش‌های ارایه شده در جدول (۲) با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده حاصل از آزمون‌های دینامیکی شمع مقایسه می‌شوند. برای این منظور، پارامتر جدیدی تحت عنوان پارامتر مدل معرفی می‌شود که عبارت است از نسبت ظرفیت باربری پیش‌بینی شده حاصل از روش‌های مختلف  $(Q_p)$  به ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده به دست آمده از آزمون‌های دینامیکی شمع  $(Q_m)$ . برای ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها، بر اساس پارامتر مدل  $(Q_p/Q_m)$  از ۱۲ معیار آماری به شرح زیر به تفکیک در سه حالت جدار، نوک و کل استفاده شده است. معیارهای آماری شامل دامنه  $(R)$ ، میان  $(M)$ ، دامنه میان چارکی  $(IQR)$ ، میانگین هندسی  $(\mu_g)$ ، انحراف از معیار هندسی  $(\sigma_g)$ ، فاصله اطمینان  $(CI)$ ، ضریب تعیین  $(R^2)$ ، بهترین خط گذرا از مبدأ  $(Q_{fit}/Q_m)$ ، میزان احتمال وقوع ۵۰ و ۹۰ درصد در تابع توزیع تجمعی  $(P_i)$ ، سطح دقت  $\pm 20\%$  در نمودار توزیع نرمال لگاریتمی  $(PDF)$  و نمودار هیستوگرام  $(HD)$  و در نهایت خطای مجذور میانگین مربعات  $(RMSE)$  برای پارامتر مدل  $(Q_p/Q_m)$  هستند. بر این اساس، در هر مقایسه کم‌ترین تراز  $(R_i = 1)$  به بهترین پیش‌بینی اختصاص داده می‌شود. سپس، بر مبنای میزان دقت پیش‌بینی روش‌های باقیمانده، ترازهای  $R_i = 2$  تا  $R_i = 15$  اختصاص می‌یابند. اندیس  $(i)$  یک تا دوازده  $(R_{12}$  تا  $R_1)$  نشانگر معیارهای آماری به ترتیب ذکر شده در بالا می‌باشند. به منظور امتیازدهی نهایی به روش‌ها، از نمودارهای راداری استفاده می‌شود. در شکل ۴



$$\mu_g = \sqrt[n]{\left(\frac{Q_p}{Q_m}\right)_1 \left(\frac{Q_p}{Q_m}\right)_2 \left(\frac{Q_p}{Q_m}\right)_3 \dots \left(\frac{Q_p}{Q_m}\right)_n} \quad (2)$$

با توجه به این پارامتر آماری، آن دسته از روش‌هایی که مقدار میانگین هندسی ( $\mu_g$ ) برای آن‌ها بالاتر از خط معیار (تراز ۱) است، دارای تخمین دست بالا و در نقطه مقابل، روش‌هایی که مقدار میانگین هندسی ( $\mu_g$ ) برای آن‌ها پایین‌تر از خط معیار است، دارای تخمین دست پایین هستند.

#### ۴-۵- انحراف از معیار هندسی، $R_5$

انحراف از معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین، داده‌ها چه مقدار از متوسط خود (میانگین هندسی) فاصله دارند. اگر انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هندسی خود هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ در حالی که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها (پارامتر مدل) می‌باشد. انحراف از معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_g = \exp \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \ln \frac{Q_p/Q_m}{\mu_g} \right)^2}{n}} \quad (3)$$

#### ۴-۶- فاصله اطمینان، $R_6$

با استفاده از فاصله اطمینان ( $CI$ ) می‌توان احتمال برآورد میانگین داده‌ها را بالا برد. آنچه که باعث بالا رفتن صحت و دقت در یک فاصله اطمینان می‌شود، نمونه بزرگ‌تر است. در یک سطح اطمینان ثابت ( $CL$ )، فاصله اطمینان خوب، فاصله‌ای است که با کوچک‌ترین عرض از صحت برخوردار باشد. به‌عبارت دیگر، هدف در محاسبه فاصله اطمینان ( $CI$ )، به‌دست آوردن حدودی برای پارامتر است که در سطح اطمینان تعیین شده (در اینجا ۹۵٪)، شامل پارامتر باشد.

#### ۴-۷- ضریب تعیین، $R_7$

ضریب تعیین یا ضریب تشخیص رگرسیون ( $R^2$ ) بیانگر بهترین خط برازش شده برای نمودار ظرفیت باربری پیش‌بینی شده ( $Q_p$ ) نسبت به ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده ( $Q_m$ )

پارامتر آماری به سوی صفر میل کند به این معناست که روش مورد نظر از پراکندگی کمتر و کیفیت بهتری برخوردار است.

#### ۴-۲- میانه، $R_2$

میانه ( $M$ ) معیار آماری است که نیمی از داده‌ها کوچک‌تر از آن و نیمی دیگر، بزرگ‌تر از آن هستند. اگر داده‌ها (پارامترهای مدل) همگن نباشند و داده‌های با پراکندگی بالا وجود داشته باشند، معیارهای تمایل به مرکز مانند میانه، شاخص خوبی برای ارزیابی می‌باشند. هر چه میانه به سمت یک تمایل پیدا کند به این معناست که روش مورد نظر دارای کیفیت پیش‌بینی مطلوب‌تری است.

#### ۴-۳- دامنه میان چارکی، $R_3$

علاوه بر تعیین مکان مرکز داده‌ها (شاخص‌های آماری نظیر میانگین، میانه و...)، جنبه مهمی از مطالعه توصیفی داده‌ها، اندازه‌گیری عددی میزان پراکندگی داده‌ها حول مرکز است. دو مجموعه از داده‌ها ممکن است دارای مراکز یکسانی باشند ولی از نظر پراکندگی به اندازه قابل توجهی با هم متفاوت باشند. برای حل این مشکل، استفاده از معیار دامنه نمونه ( $R$ ) که ممکن است بر اثر وجود یک یا دو مشاهده غیرمعمول و دور از انتظار، یک مقدار غیرمعمولی را اختیار کند، اصلاحی به عمل می‌آید و فاصله بین چارک‌های اول و سوم محاسبه می‌شود که دامنه میان چارکی ( $IQR$ ) نام دارد. این پارامتر آماری یکی از سنجش‌های پراکندگی است که شامل پراکندگی ۵۰٪ میانی مشاهدات است و از چارک اول تا چارک سوم را شامل می‌شود. این پارامتر هم مانند دامنه ( $R$ ) هر چه به سوی صفر تمایل پیدا کند، از اعتبار بالاتری برخوردار است.

در نمودار جعبه‌ای شکل ۵، دامنه ( $R$ )، میانه ( $M$ ) و حدود دامنه میان چارکی ( $IQR$ ) برای پارامترهای مدل به‌دست آمده از روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری جدار، نوک و کل نمایش داده شده‌اند.

#### ۴-۴- میانگین هندسی، $R_4$

میانگین هندسی ( $\mu_g$ ) برابر با ریشه  $n$ ام حاصل ضرب  $n$  متغیر است که مطابق رابطه ۲ به‌دست می‌آید. این میانگین بر خلاف میانگین حسابی به مقادیر غالب داده‌ها (پارامتر مدل) نزدیک‌تر است.

$$P_i(\%) = \frac{i}{n+1} \times 100 \quad (5)$$

#### ۴-۱۰- تابع چگالی احتمال، $R_{10}$

حالت ایده‌آل زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار پارامتر مدل برابر یک باشد. ولی عملاً، به‌ویژه به دلیل عدم قطعیت‌های حوزه ژئوتکنیک، احتمال وقوع حالت ایده‌آل کم است. در نتیجه، با توجه به پراکندگی نتایج، حدود بالا و پایین برای نسبت فوق در نظر گرفته می‌شوند. به این صورت که هر چه میزان تجمع داده‌ها در این محدوده مشخص بیشتر باشد، آن روش دارای پراکندگی کمتری است و ایده‌آل‌تر است. برای این منظور، در این تحقیق مبنای میزان دقت  $\pm 20\%$  در نظر گرفته شده است. ابتدا تابع چگالی احتمال پارامترهای مدل ( $Q_p/Q_m$ ) از رابطه ۶ برای ۱۵ روش مورد مطالعه برای سه مقدار ظرفیت جدار، نوک و کل تعیین می‌شود و سپس، نمودار تابع چگالی احتمال برای روش‌ها رسم و مساحت زیر نمودار در محدوده  $0.8 < Q_p/Q_m < 1.2$  محاسبه می‌شود. هرچه مساحت نمودارهای یاد شده در محدوده فوق به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، روش انتخابی دارای دقت بیشتر و احتمال تطابق ظرفیت باربری پیش‌بینی شده ( $Q_p$ ) به ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده ( $Q_m$ ) در آن روش نیز بیشتر خواهد بود. نمودار چگالی احتمال برای روش‌های مختلف در ظرفیت باربری جدار، نوک و نهایی در شکل ۹ آورده شده است.

$$f(x|\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

#### ۴-۱۱- توزیع هیستوگرام، $R_{11}$

نمودار هیستوگرام نمایش مناسبی از ارائه گرافیکی توزیع داده‌هاست که فراوانی یا درصد فراوانی هر کدام از طبقات را به صورت ستونی نشان می‌دهد. در این معیار آماری، همانند تابع چگالی احتمال، سطح دقت  $\pm 20\%$  انتخاب شده است. این بدین معناست، روش‌هایی که مقادیر پارامتر مدل ( $Q_p/Q_m$ ) بیش‌تری در بازه  $0.8$  تا  $1.2$  دارند، دارای عملکرد و کیفیت پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر روش‌ها هستند. نمودار هیستوگرام برای روش‌های مختلف در تعیین ظرفیت باربری کل شمع در شکل ۱۰ رسم شده است.

است که مطابق رابطه ۴ تعریف می‌شود. ضریب تعیین همواره بین ۰ و ۱ واقع است. عدد صفر نشان دهنده آن است که هیچ یک از مقادیر پارامتر مدل ( $Q_p/Q_m$ ) بر روی خط برازش شده قرار نخواهند گرفت و عدد ۱ بیانگر این موضوع است که تمامی مقادیر پارامتر مدل بر روی خط برازش شده قرار گرفته‌اند. بنابراین، یک مدل رگرسیونی خوب دارای ضریب تعیین ( $R^2$ ) بالا و نزدیک به یک است. به‌منظور درک بهتر، بهترین خط برازش شده از پارامترهای مدل برای هر روش در ظرفیت باربری کل شمع در شکل ۶ آورده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - Q_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - \bar{Q}_{mi})^2} \quad (4)$$

#### ۴-۸- معادله بهترین خط گذرا از مبدأ، $R_8$

در این روش همانند معیار آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، نتایج ظرفیت باربری محاسبه شده ( $Q_p$ )، در مقابل ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده از آزمایش دینامیکی ( $Q_m$ )، رسم شده و بهترین خط برازش یافته‌ی گذرا از مبدأ، برای داده‌ها مورد اشاره رسم و خط ایده‌آل برازش شده (خط گذرا از مبدأ با شیب مساوی ۱) نیز رسم شده است. با توجه به این معیار آماری، هر چه نسبت ( $Q_{fit}/Q_m$ ) به یک نزدیک‌تر باشد، آن روش بیش‌ترین تطبیق را از خود نشان می‌دهد. بهترین خط گذرا از مبدأ از پارامترهای  $Q_p$  و  $Q_m$  برای هر روش در ظرفیت باربری کل شمع در شکل ۷ آورده شده است.

#### ۴-۹- تابع توزیع تجمعی، $R_9$

در این حالت، نمودار میزان احتمال تجمعی پارامترهای مدل برای هر یک از روش‌ها رسم و میزان احتمال وقوع ۵۰ و ۹۰ درصد ( $P_{50}$  و  $P_{90}$ ) ارائه شده‌اند. هر روشی که در آن میزان احتمال تجمعی ۵۰ درصد، به عدد یک نزدیک‌تر و میزان تفاضل احتمال تجمعی ۵۰ درصد و ۹۰ درصد کمتر باشد، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. به‌عنوان مثال، شکل ۸ نمودار تابع توزیع تجمعی هر یک از روش‌ها را به تفکیک در ظرفیت باربری جدار، نوک و کل نمایش می‌دهد. طبق این روش، پارامترهای مدل محاسبه شده برای هر یک از روش‌ها به ترتیب صعودی مرتب و از ۱ تا  $n$  شماره‌گذاری می‌شوند. برای هر یک از این نسبت‌ها، فاکتور احتمال تجمعی با رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

#### ۴-۱۲- خطای مجذور میانگین مربعات، $R_{12}$

بخش عمده عملکرد روش‌ها در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها مربوط به مدل و خطاهای مربوط به آن است. به‌منظور مقایسه بهتر هر یک از روش‌ها، پارامتری به نام خطای مجذور میانگین مربعات ( $RMSE$ ) استفاده می‌شود که از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_{mi} - Q_{pi})^2}{n}} \quad (7)$$

براساس این تابع، هر چه جواب به صفر نزدیک‌تر باشد، روش مورد نظر از خطای کمتر و در نتیجه از عملکرد بهتری برخوردار است. در نمودار میله‌ای شکل ۱۱، مقدار خطای مجذور میانگین مربعات ( $RMSE$ ) برای روش‌های مختلف در تعیین ظرفیت باربری جدار، نوک و کل شمع رسم شده است.

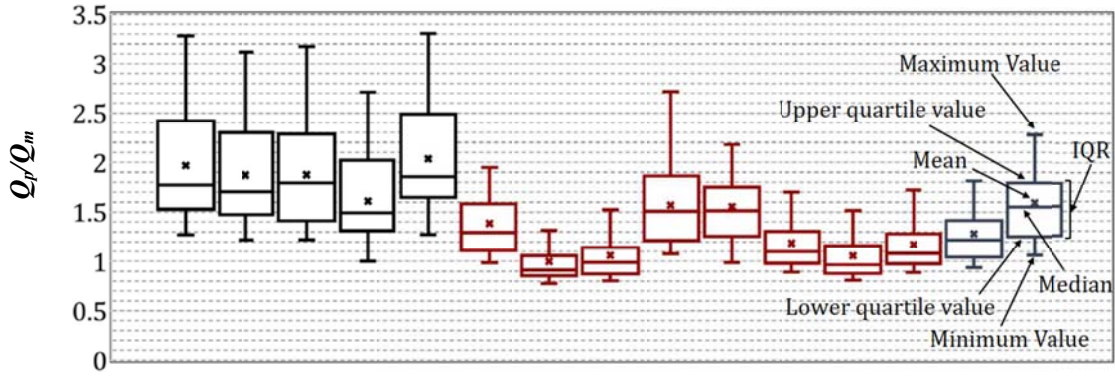
#### ۵- ارزیابی کیفیت پیش‌بینی روش‌های مختلف

##### تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها

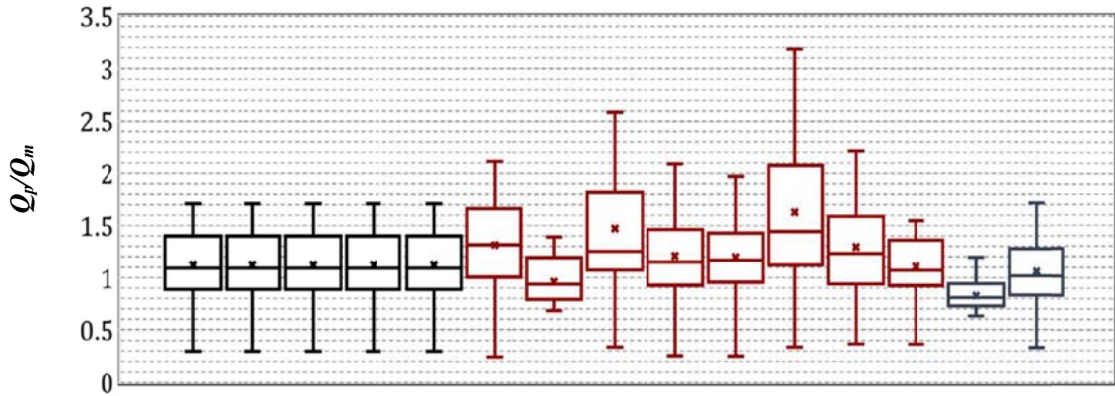
همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، به‌منظور امتیازدهی نهایی به روش‌ها، از نمودارهای راداری برای تعیین مناسب‌ترین روش تخمین ظرفیت باربری جدار، نوک و کل استفاده می‌شود. بدین صورت که درصد مساحت اشغال شده توسط یک روش نسبت به مساحت کل نمودار، به‌عنوان نسبت سطح ( $AR$ ) معرفی می‌شود. روش‌هایی که عملکرد بهتری دارند، این

مقدار برایشان بزرگ‌تر و به ۱۰۰ نزدیک‌تر است. پارامترهای آماری به‌کار گرفته شده در نمودارهای راداری در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. در جدول‌های ۳ تا ۵، عملکرد هر یک از روش‌های تعیین ظرفیت باربری ۱۵ گانه به تفکیک ظرفیت باربری جدار، نوک و کل بر اساس ۱۲ معیار آماری نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، نمودارهای راداری برای هر یک از روش‌ها آورده شده‌اند.

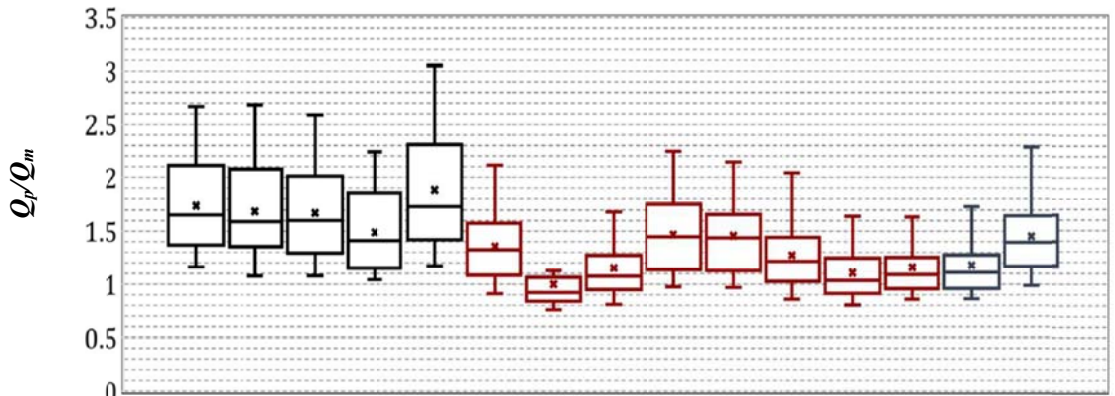
براساس جدول‌های ۳ تا ۵ و شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، روش‌های اشمرتمن (۱۹۷۸)، پرایس و واردل (۱۹۸۲) و بوستامانته و جیانسللی (۱۹۸۲) به ترتیب در پیش‌بینی ظرفیت باربری جدار، نوک و کل کمترین پراکندگی و در نتیجه بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند. تحلیل‌های آماری به صراحت نشان می‌دهند که روش‌های مستقیم مبتنی بر نتایج آزمون مخروط ( $CPT$  و  $CPTu$ ) عملکرد و کیفیت پیش‌بینی بهتری نسبت روش‌های تحلیل استاتیکی دارند. در میان روش‌های مبتنی بر نتایج آزمون نفوذ مخروط، نتایج روش‌های مبتنی بر  $CPT$  (آزمایش نفوذ مخروط مکانیکی) بهتر از نتایج روش‌های مبتنی  $CPTu$  (آزمایش نفوذ مخروط الکتریکی) هستند. مسلماً دلیل این موضوع آن است که این دسته از روش‌ها از مقادیر مقاومت کل نوک مخروط ( $q_c$ ) مبتنی بر تحلیل تنش کل و بدون حذف تأثیر فشار آب حفره‌ای برای تخمین‌ها استفاده می‌کنند و مطمئناً تطابق این دسته از روش‌ها با نتایج آزمون تحلیل دینامیکی بلافاصله بعد از کوبش (حالت ظرفیت باربری کوتاه مدت) بیش‌تر است.



(الف)



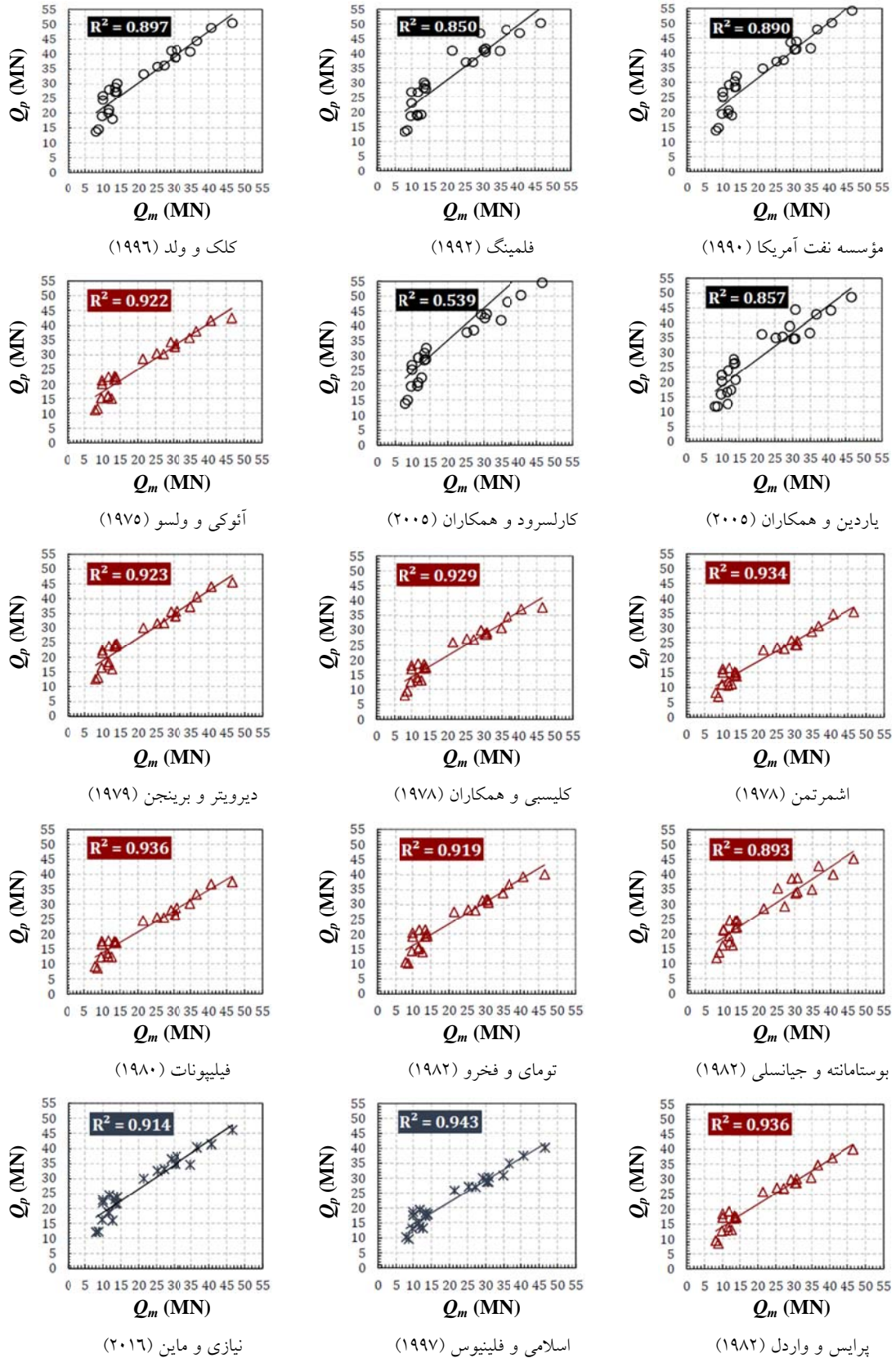
(ب)



مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)  
 فلمینگ (۱۹۹۲)  
 کلک و ولد (۱۹۹۶)  
 یاردین و همکاران (۲۰۰۵)  
 کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)  
 آتوکی و ولسو (۱۹۷۵)  
 کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)  
 اشمرتین (۱۹۷۸)  
 دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)  
 فیلیپونات (۱۹۸۰)  
 تومای و فخر (۱۹۸۲)  
 بوستامانه و چیانسی (۱۹۸۲)  
 پرایس و واردل (۱۹۸۲)  
 اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)  
 نیازی و ماین (۲۰۱۶)

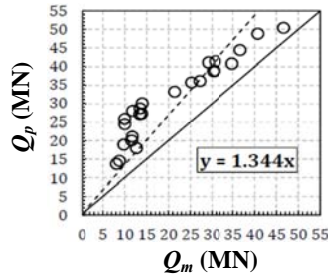
(پ)

شکل ۵. عملکرد هر یک از روش‌ها در تعیین ظرفیت باربری: (الف) جدار، (ب) نوک، و (پ) کل

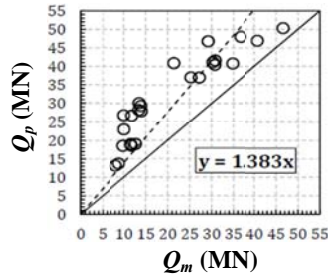


شکل ۶. بهترین خط برازش شده (رگرسیون) برای پارامتر مدل ( $Q_p/Q_m$ ) در ظرفیت باربری کل

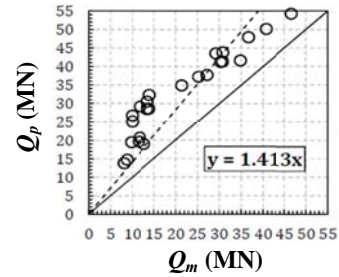




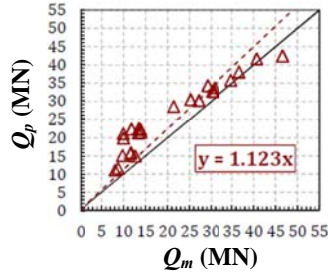
کلک و ولد (۱۹۹۶)



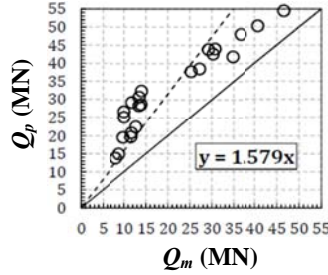
فلمنگ (۱۹۹۲)



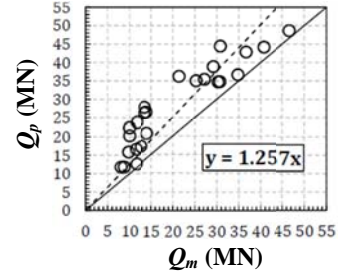
مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)



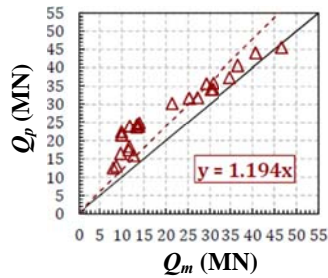
آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)



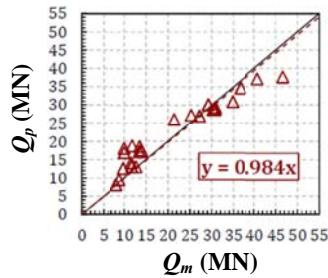
کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)



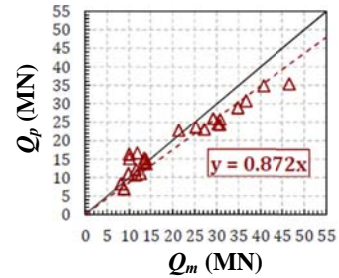
یاردین و همکاران (۲۰۰۵)



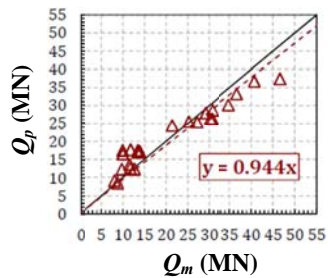
دیرویتر و برینجن (۱۹۷۹)



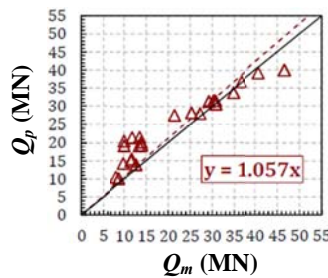
کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)



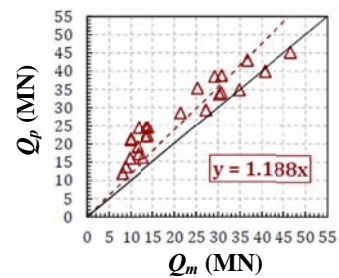
اشمرتمن (۱۹۷۸)



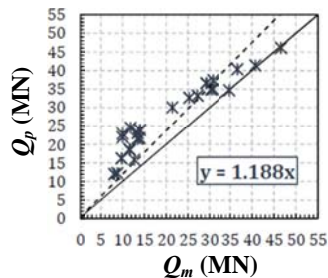
فیلیپونات (۱۹۸۰)



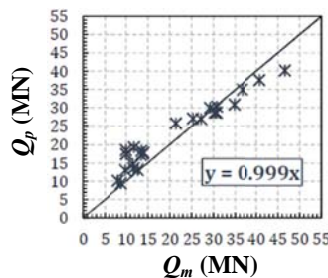
تومای و فخر و (۱۹۸۲)



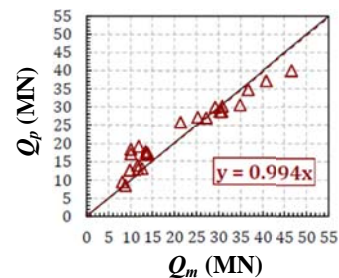
بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)



نیازی و ماین (۲۰۱۶)

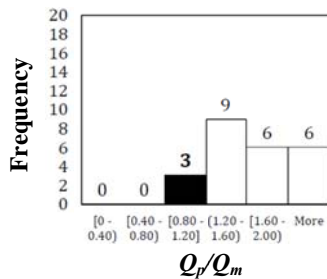


اسلامی و فثینوس (۱۹۹۷)

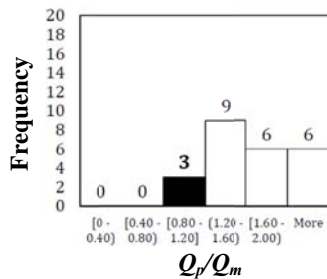


پرایس و واردل (۱۹۸۲)

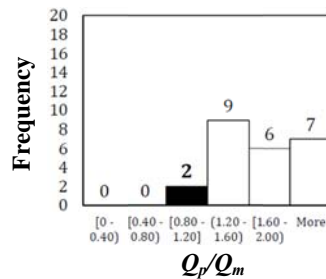
شکل ۷. بهترین خط گذرنده از مبدأ برای پارامتر مدل ( $Q_p/Q_m$ ) در ظرفیت باربری کل



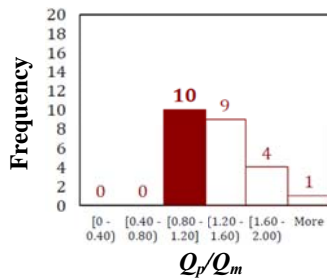
کلیک و ولد (۱۹۹۶)



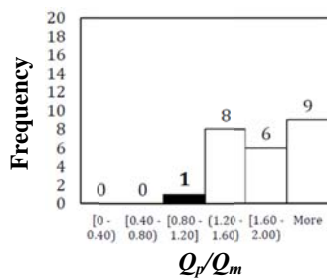
فلمنگ (۱۹۹۲)



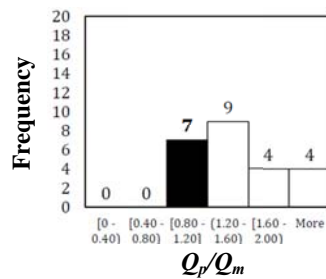
مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)



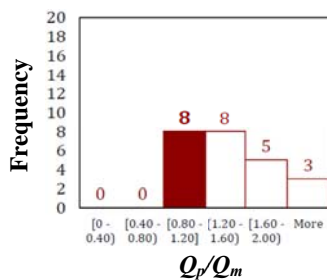
آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)



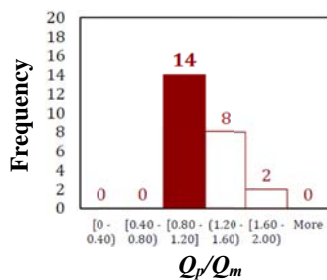
کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)



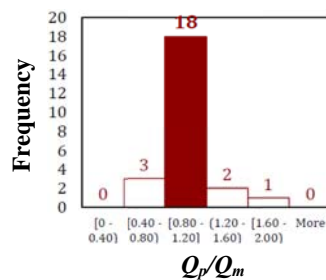
یاردین و همکاران (۲۰۰۵)



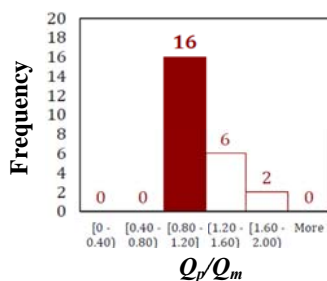
دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)



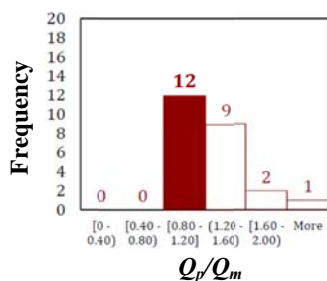
کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)



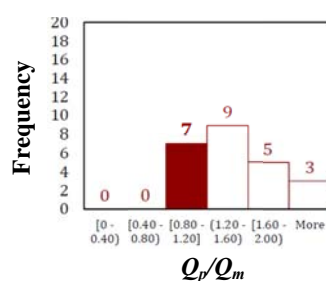
اشمرتمن (۱۹۷۸)



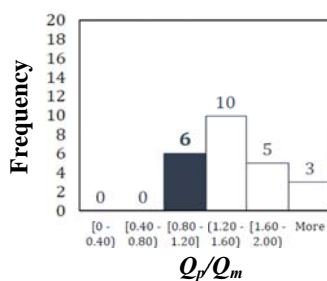
فیلیونات (۱۹۸۰)



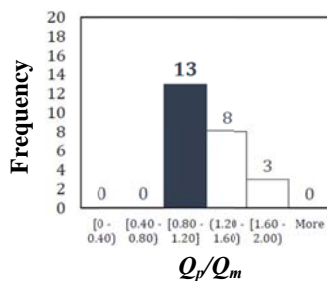
توما و فخر (۱۹۸۲)



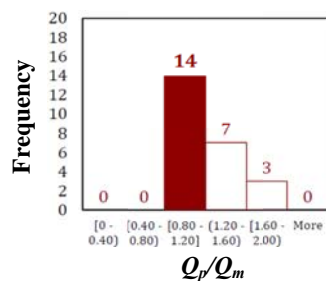
بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)



نیازی و ماین (۲۰۱۶)

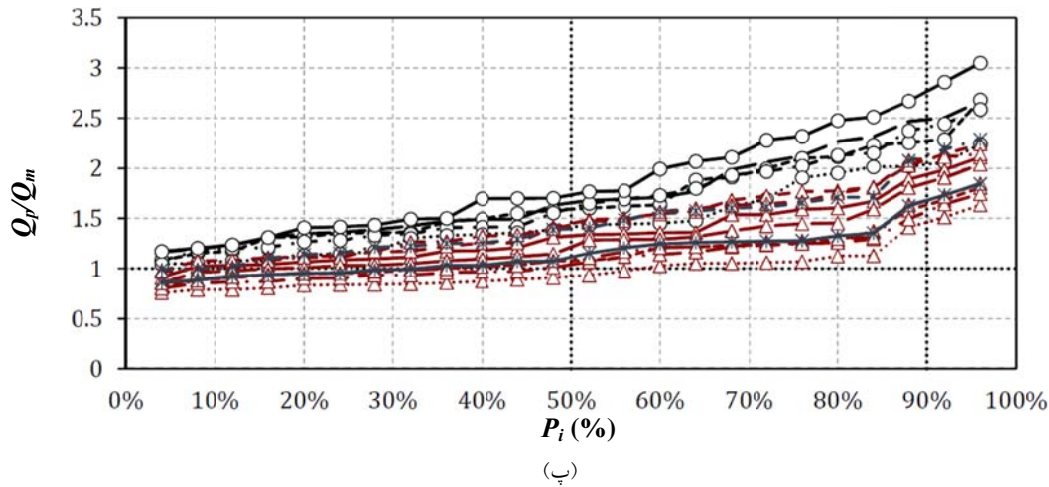
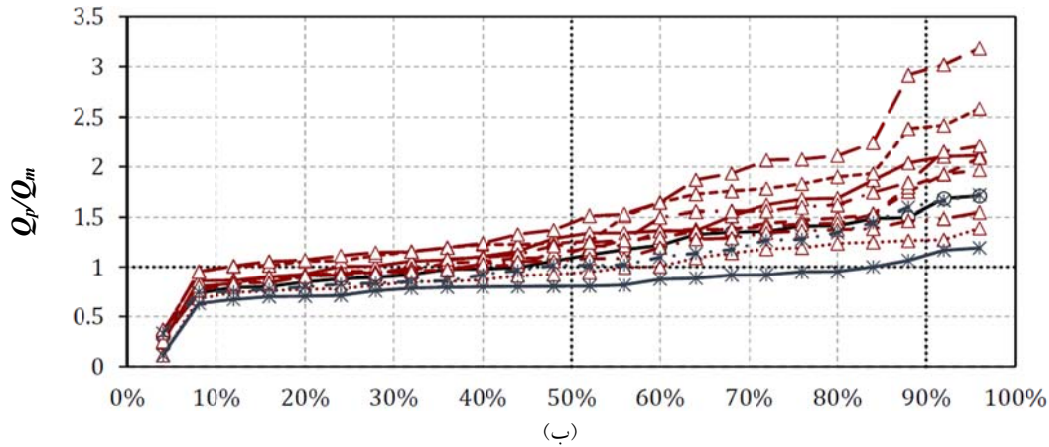
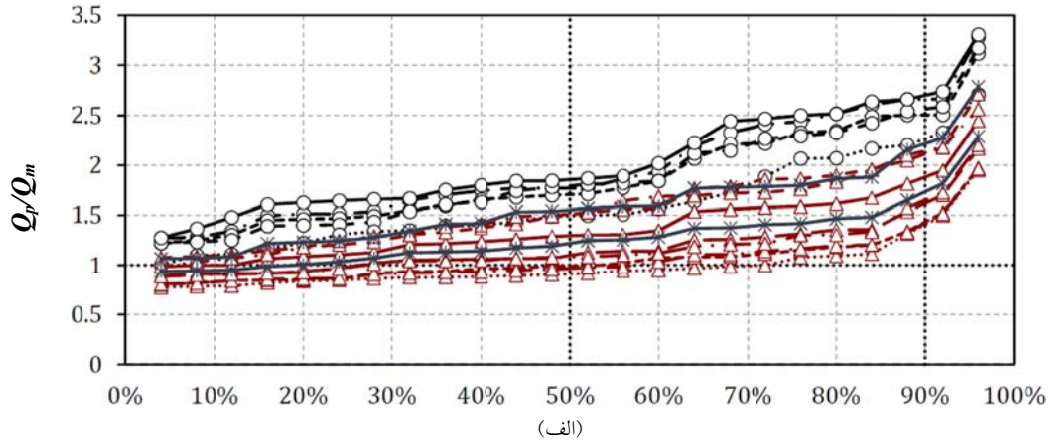


اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)



پرایس و واردل (۱۹۸۲)

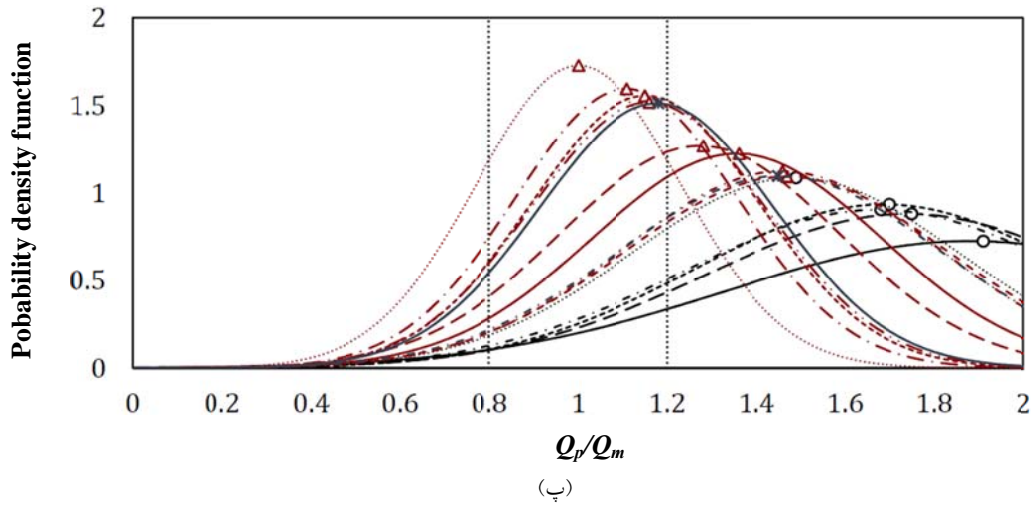
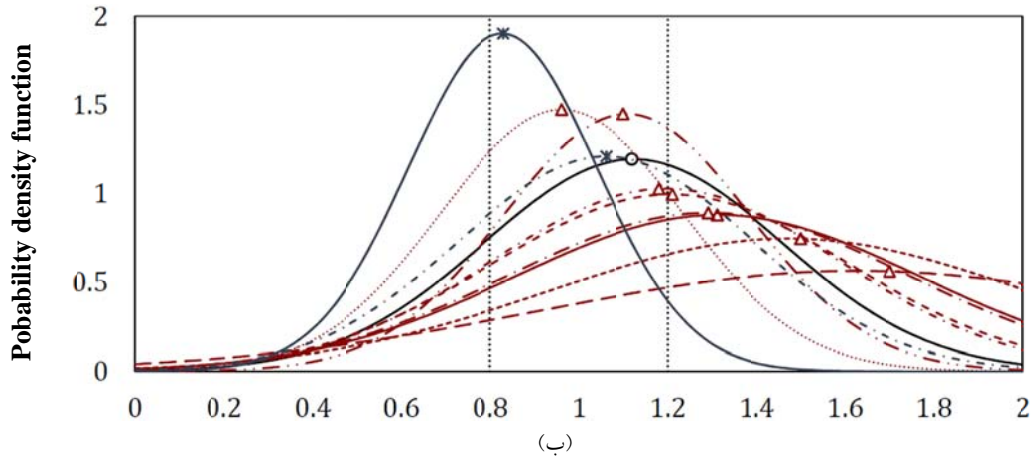
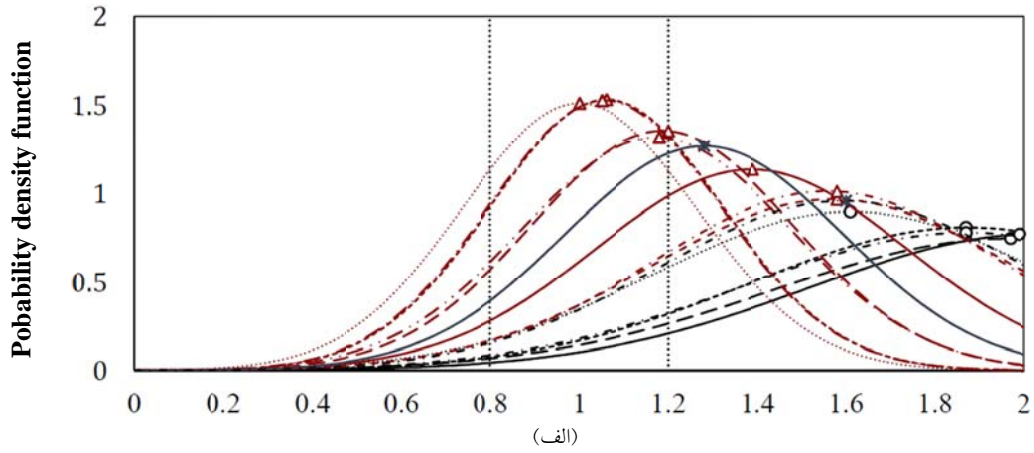
شکل ۸ نمودار هیستوگرام فراوانی مقادیر پارامتر مدل برای هر یک از روش‌های تخمین ظرفیت باربری کل شمع



- |                               |                                 |                             |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| —○— مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)   | —△— آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)         | —△— تومای و فخر و (۱۹۸۲)    |
| —○— فلمینگ (۱۹۹۲)             | —△— اشمترتمن (۱۹۷۸)             | —△— فیلیپونات (۱۹۸۰)        |
| —○— کلک و ولد (۱۹۹۶)          | —△— کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)      | —△— پرایس و واردل (۱۹۸۲)    |
| —○— یاردین و همکاران (۲۰۰۵)   | —△— دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)     | —*— اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷) |
| —○— کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵) | —△— بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) | —*— نیازی و ماین (۲۰۱۶)     |

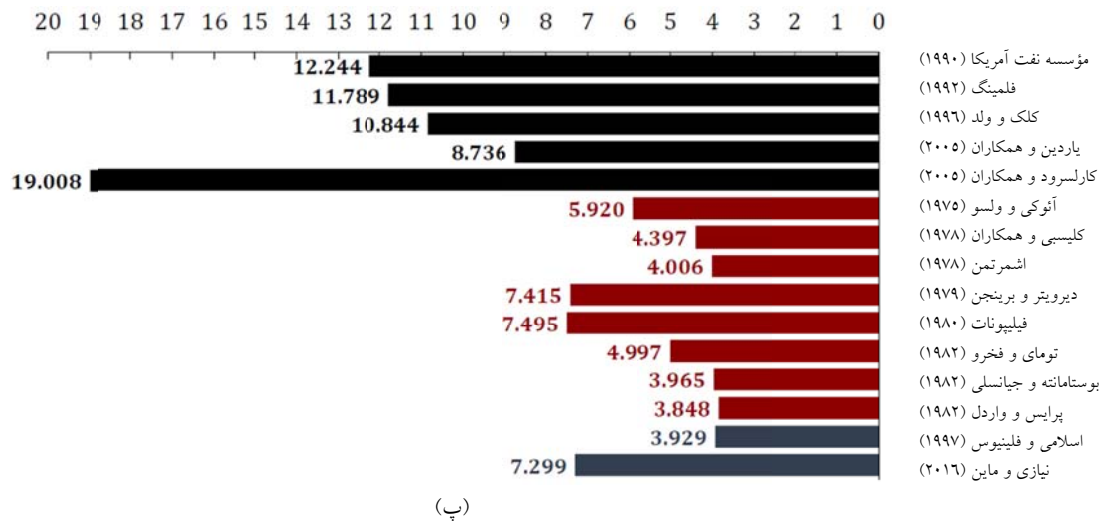
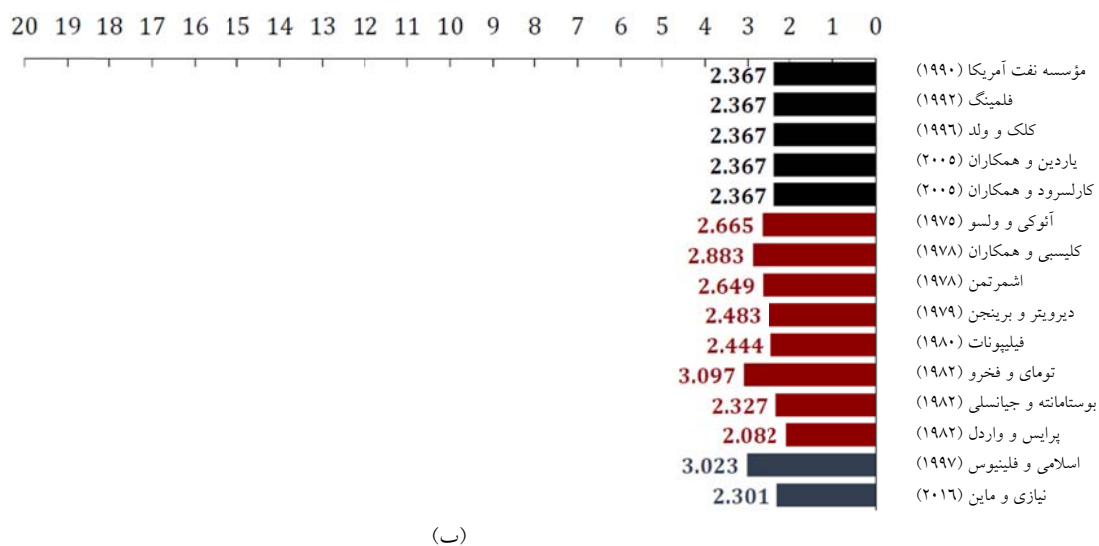
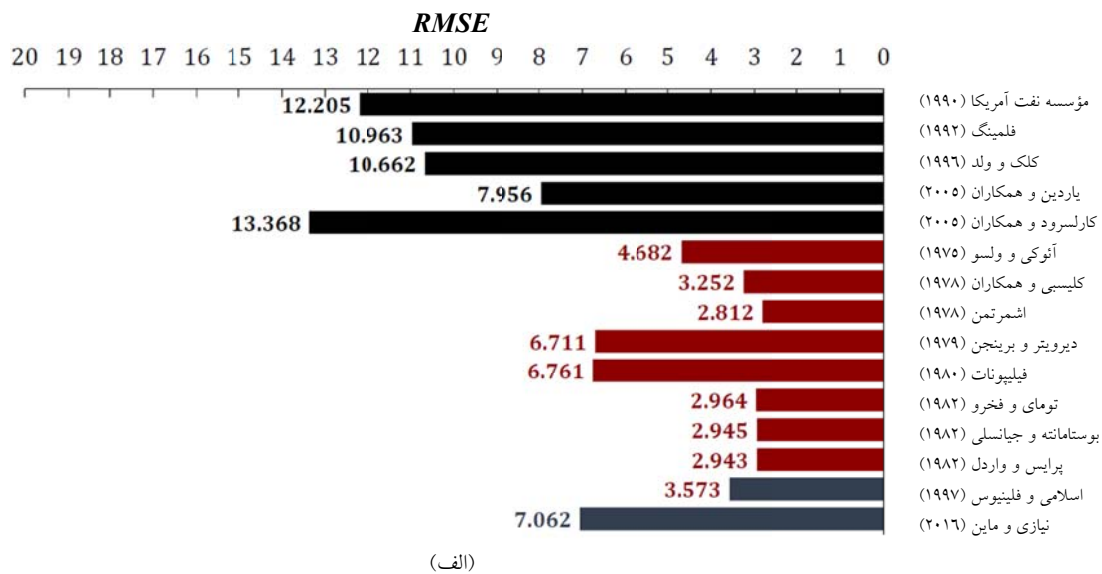
شکل ۹. نمودار تابع توزیع احتمال تجمعی برای ظرفیت باربری: (الف) جدار، (ب) نوک، و (پ) کل در شمع‌های مورد مطالعه





- |                         |      |                             |       |                           |       |
|-------------------------|------|-----------------------------|-------|---------------------------|-------|
| تومای و فخرو (۱۹۸۲)     | -△-  | آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)         | -△-   | مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)   | -○-   |
| فیلیپونات (۱۹۸۰)        | •△•  | اشمرتمن (۱۹۷۸)              | ••△•• | فلمنگ (۱۹۹۲)              | ••○•• |
| پرایس و واردل (۱۹۸۲)    | •△•  | کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)      | -△-   | کلک و ولد (۱۹۹۶)          | -○-   |
| اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷) | *-*  | دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)     | -△-   | یاردین و همکاران (۲۰۰۵)   | -○•-  |
| نیازی و ماین (۲۰۱۶)     | -*-- | بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲) | -△-   | کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵) | -○-   |

شکل ۱۰. تابع چگالی احتمال برای ظرفیت باربری: (الف) جدار، (ب) نوک، و (پ) کل در شمع‌های مورد مطالعه



شکل ۱۱. خطای مجذور میانگین مربعات برای روش‌های تخمین ظرفیت باربری: (الف) جدار، (ب) نوک، و (پ) کل

جدول ۳. امتیازدهی نهایی روش‌های ظرفیت باربری جدار بر اساس شاخصه‌های آماری

روش	R	R <sub>I</sub>	M	R <sub>2</sub>	IQR	R <sub>3</sub>	μ <sub>g</sub>	R <sub>4</sub>	σ <sub>g</sub>	R <sub>5</sub>	CI	R <sub>6</sub>	R <sup>2</sup>	R <sub>7</sub>
مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)	۲/۰۰۷	۱۴	۱/۷۷	۱۳	۰/۸۹۰	۱۵	۱/۹۰۴	۱۴	۳/۳۰۸	۱۳	۰/۰۹۲	۱۴	۰/۸۵۳	۱۴
فلمنینگ (۱۹۹۲)	۱/۸۹۷	۱۲	۱/۷۱	۱۲	۰/۸۲۶	۱۲	۱/۸۱۵	۱۲	۳/۱۶۲	۱۲	۰/۰۸۳	۱۲	۰/۸۷۰	۱۲
کلک و ولد (۱۹۹۶)	۱/۹۵۲	۱۳	۱/۷۹	۱۴	۰/۸۷۴	۱۴	۱/۸۱۱	۱۳	۳/۳۶۳	۱۳	۰/۰۸۴	۱۴	۰/۸۷۳	۱۱
یاردین و همکاران (۲۰۰۵)	۱/۷۱۱	۱۰	۱/۴۹	۸	۰/۷۰۸	۱۱	۱/۵۵۷	۱۱	۳/۳۷۲	۱۱	۰/۰۶۳	۱۵	۰/۸۴۲	۱۵
کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)	۲/۰۳۰	۱۵	۱/۸۶	۱۵	۰/۸۴۳	۱۳	۱/۹۷۶	۱۵	۳/۰۰۳	۱۵	۰/۰۹۶	۸	۰/۸۶۸	۱۳
آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)	۱/۴۶۴	۷	۱/۲۹	۷	۰/۴۷۴	۷	۱/۳۵۰	۷	۲/۹۳۰	۷	۰/۰۴۳	۷	۰/۹۲۴	۷
کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)	۱/۱۷۴	۳	۰/۹۱	۳	۰/۲۰۶	۱	۰/۹۷۴	۱	۲/۷۹۶	۱	۰/۰۲۲	۵	۰/۹۳۲	۶
اشمرتمن (۱۹۷۸)	۱/۱۷۱	۲	۰/۹۹	۱	۰/۲۶۸	۲	۱/۰۳۷	۲	۲/۶۸۹	۳	۰/۰۲۲	۱	۰/۹۴۲	۱
دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)	۱/۶۳۸	۹	۱/۵۱	۹	۰/۶۵۱	۱۰	۱/۵۲۳	۹	۳/۱۵۵	۹	۰/۰۵۸	۱۱	۰/۹۱۳	۸
فیلیپونات (۱۹۸۰)	۱/۵۷۷	۸	۱/۵۱	۱۰	۰/۴۹۶	۸	۱/۵۱۲	۸	۳/۰۴۸	۹	۰/۰۵۶	۹	۰/۸۷۹	۱۰
تومای و فخر و (۱۹۸۲)	۱/۲۷۶	۴	۱/۱۰	۵	۰/۳۲۸	۵	۱/۱۵۸	۵	۲/۷۵۸	۳	۰/۰۲۹	۳	۰/۹۴۰	۴
بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)	۱/۱۵۷	۱	۰/۹۷	۲	۰/۲۸۴	۳	۱/۰۳۲	۳	۲/۷۱۷	۲	۰/۰۲۲	۲	۰/۹۴۱	۲
پرایس و واردل (۱۹۸۲)	۱/۳۱۶	۵	۱/۰۸	۴	۰/۳۰۷	۴	۱/۱۴۴	۴	۲/۸۰۶	۶	۰/۰۲۹	۶	۰/۹۳۴	۵
اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)	۱/۳۵۱	۶	۱/۲۲	۶	۰/۳۷۲	۶	۱/۲۴۹	۶	۲/۸۸۳	۶	۰/۰۳۵	۴	۰/۹۴۱	۳
نیازی و ماین (۲۰۱۶)	۱/۷۲۵	۱۱	۱/۵۵	۱۱	۰/۵۴۱	۹	۱/۵۴۷	۹	۳/۰۷۸	۱۰	۰/۰۶۰	۱۰	۰/۹۰۶	۹

جدول ۳. (ادامه)

رتبه	AR (%)	R <sub>12</sub>	RMSE	R <sub>11</sub>	HD (%)	R <sub>10</sub>	PDF	R <sub>9</sub>	P <sub>90</sub>	P <sub>50</sub>	R <sub>8</sub>	Q <sub>11</sub> /Q <sub>m</sub>	روش
۱۴	۶۰٪/۶۱	۱۴	۱۲/۲۰۵	۱۰	۰٪	۱۴	۰/۱۱۸	۱۴	۲/۶۶	۱/۷۷	۱۴	۱/۴۱۳	مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)
۱۲	۶۸٪/۸۶	۱۳	۱۰/۹۶۳	۱۰	۰٪	۱۳	۰/۱۲۱	۱۲	۲/۵۱	۱/۷۱	۱۳	۱/۳۸۳	فلمنینگ (۱۹۹۲)
۱۳	۶۶٪/۰۳	۱۲	۱۰/۶۶۲	۱۰	۰٪	۱۲	۰/۱۲۹	۱۳	۲/۵۷	۱/۷۹	۱۲	۱/۳۴۴	کلک و ولد (۱۹۹۶)
۱۱	۷۴٪/۰۳	۱۱	۷/۹۵۶	۸	۱۷٪	۱۰	۰/۱۸۱	۱۱	۲/۲۶	۱/۴۹	۱۱	۱/۲۵۷	یاردین و همکاران (۲۰۰۵)
۱۵	۶۰٪/۴۵	۱۵	۱۳/۳۶۸	۱۰	۰٪	۱۵	۰/۰۹۵	۱۵	۲/۷۰	۱/۸۶	۱۵	۱/۵۷۹	کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)
۷	۹۰٪/۰۲	۷	۴/۶۸۲	۶	۲۹٪	۷	۰/۲۶۷	۷	۱/۸۸	۱/۲۹	۶	۱/۱۲۳	آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)
۳	۹۷٪/۸۳	۵	۳/۲۵۲	۲	۷۵٪	۱	۰/۵۶۴	۳	۱/۴۱	۰/۹۱	۷	۰/۸۷۲	کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)
۱	۹۹٪/۳۹	۱	۲/۸۱۲	۱	۸۳٪	۳	۰/۵۵۷	۱	۱/۴۳	۰/۹۹	۳	۰/۹۸۴	اشمرتمن (۱۹۷۸)
۹	۸۳٪/۲۷	۸	۶/۷۱۱	۷	۲۱٪	۸	۰/۱۸۴	۸	۲/۱۱	۱/۵۱	۱۰	۱/۱۹۴	دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)
۸	۸۴٪/۰۰	۹	۶/۷۶۱	۷	۲۱٪	۹	۰/۱۸۲	۹	۲/۱۴	۱/۵۱	۹	۱/۱۸۹	فیلیپونات (۱۹۸۰)
۵	۹۵٪/۸۷	۴	۲/۹۶۴	۴	۶۳٪	۵	۰/۴۳۵	۴	۱/۶۲	۱/۱۰	۵	۱/۰۵۷	تومای و فخر و (۱۹۸۲)
۲	۹۹٪/۰۴	۳	۲/۹۴۵	۱	۸۳٪	۲	۰/۵۵۸	۲	۱/۴۲	۰/۹۷	۴	۰/۹۴۴	بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)
۴	۹۶٪/۶۵	۲	۲/۹۴۳	۳	۶۷٪	۴	۰/۴۳۸	۵	۱/۶۵	۱/۰۸	۲	۰/۹۹۴	پرایس و واردل (۱۹۸۲)
۶	۹۴٪/۳۹	۶	۳/۵۷۳	۵	۵۰٪	۶	۰/۳۴۸	۶	۱/۷۳	۱/۲۲	۱	۰/۹۹۹	اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)
۱۰	۷۹٪/۳۲	۱۰	۷/۰۶۲	۹	۱۳٪	۱۱	۰/۱۷۵	۱۰	۲/۲۲	۱/۵۵	۸	۱/۱۸۸	نیازی و ماین (۲۰۱۶)

جدول ۴. امتیازدهی نهایی روش‌های ظرفیت باربری نوک بر اساس شاخصه‌های آماری

روش	R	R <sub>I</sub>	M	R <sub>2</sub>	IQR	R <sub>3</sub>	μ <sub>g</sub>	R <sub>4</sub>	σ <sub>g</sub>	R <sub>5</sub>	CI	R <sub>6</sub>	R <sup>2</sup>	R <sub>7</sub>
مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)	۱/۴۱۱	۵	۱/۰۹	۴	۰/۵۱	۶	۱/۰۶۳	۶	۵/۸۰۲	۳	۰/۰۲۹	۳	۰/۶۴۲	۴
فلمنینگ (۱۹۹۲)	۱/۴۱۱	۵	۱/۰۹	۴	۰/۵۱	۶	۱/۰۶۳	۶	۵/۸۰۲	۳	۰/۰۲۹	۳	۰/۶۴۲	۴
کلک و ولد (۱۹۹۶)	۱/۴۱۱	۵	۱/۰۹	۴	۰/۵۱	۶	۱/۰۶۳	۶	۵/۸۰۲	۳	۰/۰۲۹	۳	۰/۶۴۲	۴
یاردین و همکاران (۲۰۰۵)	۱/۴۱۱	۵	۱/۰۹	۴	۰/۵۱	۶	۱/۰۶۳	۶	۵/۸۰۲	۳	۰/۰۲۹	۳	۰/۶۴۲	۴
کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)	۱/۴۱۱	۵	۱/۰۹	۴	۰/۵۱	۶	۱/۰۶۳	۶	۵/۸۰۲	۳	۰/۰۲۹	۳	۰/۶۴۲	۴
آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)	۱/۸۷۱	۹	۱/۳۱	۱۰	۰/۶۶	۹	۱/۲۱۷	۸	۸/۴۶۵	۹	۰/۰۴۵	۹	۰/۴۹۴	۹
کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)	۱/۲۷۷	۳	۰/۹۴	۲	۰/۴۰	۲	۰/۸۹۳	۲	۱۰/۲۲۹	۱۱	۰/۰۲۲	۱۱	۰/۴۷۵	۱۰
اشمرتمن (۱۹۷۸)	۱/۲۵۱	۱۰	۱/۲۵	۹	۰/۷۴	۱۰	۱/۳۶۶	۱۰	۷/۶۱۶	۷	۰/۰۵۹	۷	۰/۵۷۲	۶
دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)	۱/۸۳۸	۷	۱/۱۵	۵	۰/۵۴	۷	۱/۱۲۷	۶	۷/۳۶۴	۶	۰/۰۳۷	۶	۰/۵۶۶	۷
فیلیپونات (۱۹۸۰)	۱/۷۱۷	۶	۱/۱۶	۶	۰/۴۷	۵	۱/۱۱۹	۵	۷/۱۴۵	۵	۰/۰۳۶	۵	۰/۵۷۸	۵
تومای و فخر و (۱۹۸۲)	۲/۸۵۰	۱۱	۱/۴۴	۱۱	۰/۹۵	۱۱	۱/۴۷۵	۱۱	۹/۹۱۱	۱۱	۰/۰۷۸	۱۰	۰/۴۷۴	۱۱
بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)	۱/۸۴۲	۸	۱/۲۳	۸	۰/۶۵	۸	۱/۲۱۰	۷	۶/۵۳۸	۷	۰/۰۴۴	۴	۰/۶۴۹	۳
پرایس و واردل (۱۹۸۲)	۱/۱۸۱	۲	۱/۰۷	۳	۰/۴۴	۳	۱/۰۶۷	۳	۴/۲۵۴	۳	۰/۰۲۴	۱	۰/۷۲۵	۱
اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)	۱/۰۷۶	۱	۰/۸۱	۷	۰/۲۲	۷	۰/۷۷۹	۱	۸/۱۲۰	۹	۰/۰۲۲	۸	۰/۵۲۷	۸
نیازی و ماین (۲۰۱۶)	۱/۳۸۷	۴	۱/۰۲	۴	۰/۴۵	۴	۱/۰۰۶	۴	۵/۱۷۶	۱	۰/۰۲۷	۲	۰/۶۹۹	۲

جدول ۴. (ادامه)

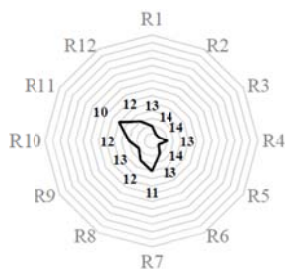
رتبه	AR (%)	R <sub>12</sub>	RMSE	R <sub>11</sub>	HD (%)	R <sub>10</sub>	PDF	R <sub>9</sub>	P <sub>90</sub>	P <sub>50</sub>	R <sub>8</sub>	Q <sub>fit</sub> /Q <sub>m</sub>	روش
۴	۹۵٪/۳۰	۴	۲/۳۶۷	۷	۳۳٪	۵	۰/۴۳۵	۴	۱/۵۹	۱/۰۹	۸	۰/۷۹۳	مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)
۴	۹۵٪/۳۰	۴	۲/۳۶۷	۷	۳۳٪	۵	۰/۴۳۵	۴	۱/۵۹	۱/۰۹	۸	۰/۷۹۳	فلمنینگ (۱۹۹۲)
۴	۹۵٪/۳۰	۴	۲/۳۶۷	۷	۳۳٪	۵	۰/۴۳۵	۴	۱/۵۹	۱/۰۹	۸	۰/۷۹۳	کلک و ولد (۱۹۹۶)
۴	۹۵٪/۳۰	۴	۲/۳۶۷	۷	۳۳٪	۵	۰/۴۳۵	۴	۱/۵۹	۱/۰۹	۸	۰/۷۹۳	یاردین و همکاران (۲۰۰۵)
۴	۹۵٪/۳۰	۴	۲/۳۶۷	۷	۳۳٪	۵	۰/۴۳۵	۴	۱/۵۹	۱/۰۹	۸	۰/۷۹۳	کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)
۱۰	۸۵٪/۸۴	۸	۲/۶۶۵	۶	۴۲٪	۹	۰/۲۹۹	۹	۲/۰۷	۱/۳۱	۳	۰/۸۸۸	آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)
۵	۹۵٪/۱۵	۹	۲/۸۸۳	۳	۵۴٪	۱	۰/۵۴۶	۱	۱/۲۷	۰/۹۴	۱۰	۰/۶۹۷	کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)
۹	۸۶٪/۰۲	۷	۲/۶۴۹	۷	۳۳٪	۱۰	۰/۲۴۶	۱۰	۲/۴۰	۱/۲۵	۱	۰/۹۹۴	اشمرتمن (۱۹۷۸)
۸	۹۱٪/۲۴	۶	۲/۴۸۳	۶	۴۲٪	۷	۰/۳۵۴	۶	۱/۷۴	۱/۱۵	۷	۰/۸۲۸	دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)
۶	۹۳٪/۳۲	۵	۲/۴۴۴	۵	۴۶٪	۶	۰/۳۶۵	۷	۱/۸۶	۱/۱۶	۶	۰/۸۳۱	فیلیپونات (۱۹۸۰)
۱۱	۷۹٪/۶۲	۱۱	۳/۰۹۷	۷	۳۳٪	۱۱	۰/۲۲۵	۱۱	۲/۹۷	۱/۴۴	۲	۱/۰۳۸	توما و فخر و (۱۹۸۲)
۷	۹۱٪/۵۰	۳	۲/۳۲۷	۷	۳۳٪	۸	۰/۳۰۷	۸	۲/۰۰	۱/۲۳	۴	۰/۸۷۵	بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)
۱	۹۸٪/۸۶	۱	۲/۰۸۲	۲	۵۸٪	۳	۰/۵۱۰	۲	۱/۴۷	۱/۰۷	۵	۰/۸۳۳	پرایس و واردل (۱۹۸۲)
۳	۹۵٪/۳۷	۱۰	۳/۰۲۳	۱	۶۳٪	۲	۰/۵۲۵	۳	۱/۱۲	۰/۸۱	۱۱	۰/۶۳۱	اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)
۲	۹۷٪/۴۲	۲	۲/۳۰۱	۴	۵۰٪	۴	۰/۴۵۹	۵	۱/۶۳	۱/۰۲	۹	۰/۷۶۹	نیازی و ماین (۲۰۱۶)

جدول ۵. امتیازدهی نهایی روش‌های ظرفیت‌باربری کل براساس شاخص‌های آماری

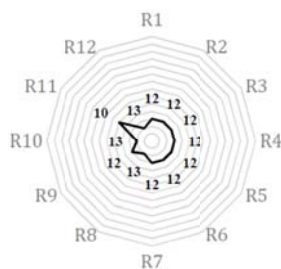
R <sub>7</sub>	R <sup>2</sup>	R <sub>6</sub>	CI	R <sub>5</sub>	σ <sub>g</sub>	R <sub>4</sub>	μ <sub>g</sub>	R <sub>3</sub>	IQR	R <sub>2</sub>	M	R <sub>1</sub>	R	روش
۱۲	۰/۸۹۰	۱۴	۰/۰۷۲	۱۳	۳/۲۰۹	۱۴	۱/۶۸۷	۱۴	۰/۷۵۲	۱۳	۱/۶۶	۱۲	۱/۵۰۴	مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)
۱۴	۰/۸۵۰	۱۳	۰/۰۶۷	۱۲	۳/۱۰۵	۱۳	۱/۶۳۹	۱۳	۰/۷۲۲	۱۲	۱/۵۹	۱۴	۱/۶۰۴	فلمنینگ (۱۹۹۲)
۱۰	۰/۸۹۷	۱۲	۰/۰۶۷	۱۴	۳/۳۰۷	۱۲	۱/۶۲۰	۱۲	۰/۷۱۶	۱۴	۱/۶۰	۱۳	۱/۵۰۶	کلک و ولد (۱۹۹۶)
۱۳	۰/۸۵۷	۱۱	۰/۰۵۱	۱۰	۳/۰۳۴	۱۱	۱/۴۴۷	۱۱	۰/۷۰۲	۹	۱/۴۱	۸	۱/۱۹۵	یاردین و همکاران (۲۰۰۵)
۱۵	۰/۵۳۹	۱۵	۰/۰۸۶	۱۵	۳/۸۳۷	۱۵	۱/۸۰۸	۱۵	۰/۸۷۹	۱۵	۱/۷۳	۱۵	۱/۸۸۱	کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)
۷	۰/۹۲۲	۷	۰/۰۴۰	۶	۲/۹۰۴	۷	۱/۳۲۲	۸	۰/۴۹۰	۷	۱/۳۳	۹	۱/۲۰۲	آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)
۴	۰/۹۳۴	۱	۰/۰۱۹	۴	۲/۷۷۴	۱	۰/۹۷۸	۱	۰/۲۴۹	۳	۰/۹۲	۱	۰/۸۷۴	کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)
۵	۰/۹۲۹	۳	۰/۰۲۴	۱	۲/۶۴۱	۳	۱/۱۲۷	۴	۰/۳۲۱	۲	۱/۰۸	۵	۰/۹۹۸	اشمرتمن (۱۹۷۸)
۶	۰/۹۲۳	۱۰	۰/۰۴۹	۱۱	۳/۰۸۹	۱۰	۱/۴۲۷	۱۰	۰/۶۲۰	۱۰	۱/۴۵	۱۰	۱/۲۶۶	دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)
۱۱	۰/۸۹۳	۸	۰/۰۴۸	۸	۳/۰۰۴	۹	۱/۴۱۷	۹	۰/۵۳۳	۱۱	۱/۴۴	۶	۱/۱۷۵	فیلیپونات (۱۹۸۰)
۸	۰/۹۱۹	۶	۰/۰۳۴	۷	۲/۹۴۰	۶	۱/۲۴۰	۶	۰/۴۱۱	۶	۱/۲۱	۷	۱/۱۸۳	توما و فخر و (۱۹۸۲)
۲	۰/۹۳۷	۲	۰/۰۲۲	۵	۲/۶۹۵	۲	۱/۰۸۳	۵	۰/۳۳۲	۱	۱/۰۴	۲	۰/۹۴۲	بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)
۳	۰/۹۳۶	۴	۰/۰۲۵	۲	۲/۶۴۳	۴	۱/۱۳۳	۲	۰/۲۹۲	۴	۱/۰۹	۴	۰/۹۹۳	پرایس و واردل (۱۹۸۲)
۱	۰/۹۴۳	۵	۰/۰۲۶	۳	۲/۶۵۳	۵	۱/۱۵۱	۳	۰/۳۱۴	۵	۱/۱۱	۳	۰/۹۸۳	اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)
۹	۰/۹۱۴	۹	۰/۰۴۸	۹	۳/۰۱۱	۸	۱/۴۱۳	۷	۰/۴۷۷	۸	۱/۴۰	۱۱	۱/۲۹۸	نیازی و ماین (۲۰۱۶)

جدول ۵. (ادامه)

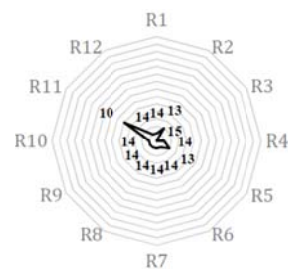
رتبه	AR (%)	R <sub>12</sub>	RMSE	R <sub>11</sub>	HD (%)	R <sub>10</sub>	PDF	R <sub>9</sub>	P <sub>90</sub>	P <sub>50</sub>	R <sub>8</sub>	Q <sub>fit</sub> /Q <sub>m</sub>	روش
۱۴	۶۲٪/۱۱	۱۴	۱۲/۲۴۴	۱۱	۸	۱۵	۰/۱۳۹	۱۴	۲/۴۸	۱/۶۶	۱۴	۱/۴۱۳	مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)
۱۳	۶۵٪/۳۵	۱۳	۱۱/۷۸۹	۱۰	۱۳	۱۴	۰/۱۴۳	۱۲	۲/۲۷	۱/۵۹	۱۳	۱/۳۸۳	فلمنینگ (۱۹۹۲)
۱۲	۶۸٪/۳۳	۱۲	۱۰/۸۴۴	۱۰	۱۳	۱۲	۰/۱۵۶	۱۳	۲/۴۱	۱/۶۰	۱۲	۱/۳۴۴	کلک و ولد (۱۹۹۶)
۱۱	۷۷٪/۵۵	۱۱	۸/۷۳۶	۹	۲۹	۱۱	۰/۲۰۷	۸	۲/۰۴	۱/۴۱	۱۱	۱/۲۵۷	یاردین و همکاران (۲۰۰۵)
۱۵	۵۴٪/۴۷	۱۵	۱۹/۰۰۸	۱۲	۴	۱۳	۰/۱۴۴	۱۵	۲/۷۷	۱/۷۳	۱۵	۱/۵۷۹	کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)
۷	۸۹٪/۵۳	۷	۵/۹۲۰	۶	۴۲	۷	۰/۲۸۵	۷	۱/۹۴	۱/۳۳	۶	۱/۱۲۳	آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)
۲	۹۸٪/۵۴	۵	۴/۳۹۷	۱	۷۵	۱	۰/۶۳۶	۳	۱/۴۶	۰/۹۲	۷	۰/۸۷۲	کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)
۴	۹۷٪/۸۸	۴	۴/۰۰۶	۳	۵۸	۳	۰/۵۰۱	۲	۱/۶۳	۱/۰۸	۳	۰/۹۸۴	اشمرتمن (۱۹۷۸)
۱۰	۸۱٪/۴۲	۹	۷/۴۱۵	۷	۳۳	۱۰	۰/۲۱۸	۹	۲/۰۹	۱/۴۵	۱۰	۱/۱۹۴	دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)
۹	۸۲٪/۸۸	۱۰	۷/۴۹۵	۸	۲۹	۹	۰/۲۲۱	۱۰	۲/۱۰	۱/۴۴	۹	۱/۱۸۹	فیلیپونات (۱۹۸۰)
۶	۹۱٪/۹۱	۶	۴/۹۹۷	۵	۵۰	۶	۰/۳۵۴	۶	۱/۸۶	۱/۲۱	۵	۱/۰۵۷	توما و فخر و (۱۹۸۲)
۱	۹۸٪/۷۴	۳	۳/۹۶۵	۲	۶۷	۲	۰/۵۴۶	۱	۱/۵۷	۱/۰۴	۴	۰/۹۴۴	بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)
۳	۹۸٪/۰۶	۱	۳/۸۴۸	۳	۵۸	۴	۰/۴۸۸	۴	۱/۶۸	۱/۰۹	۲	۰/۹۹۴	پرایس و واردل (۱۹۸۲)
۵	۹۷٪/۴۲	۲	۳/۹۲۹	۴	۵۴	۵	۰/۴۶۹	۵	۱/۶۹	۱/۱۱	۱	۰/۹۹۹	اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)
۸	۸۳٪/۷۲	۸	۷/۲۹۹	۹	۲۵	۸	۰/۲۲۷	۱۱	۲/۱۳	۱/۴۰	۸	۱/۱۸۸	نیازی و ماین (۲۰۱۶)



کلک و ولد (۱۹۹۶)



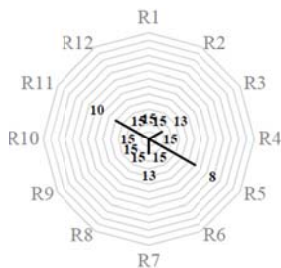
فلمیگ (۱۹۹۲)



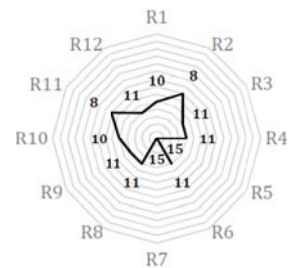
مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)



آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)



کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)



یاردین و همکاران (۲۰۰۵)



دیرویترو و برینجن (۱۹۷۹)



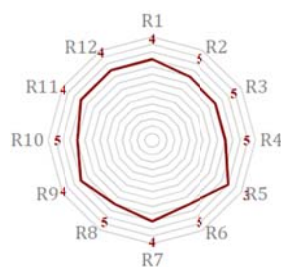
کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)



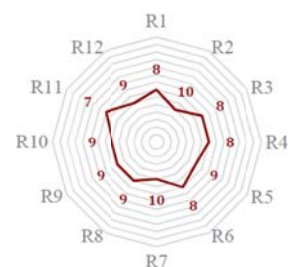
اشمرتمن (۱۹۷۸)



فیلیپونات (۱۹۸۰)



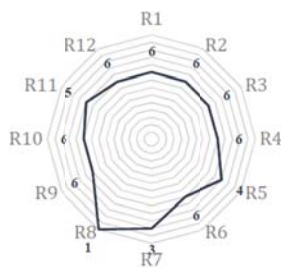
تومای و فنخرو (۱۹۸۲)



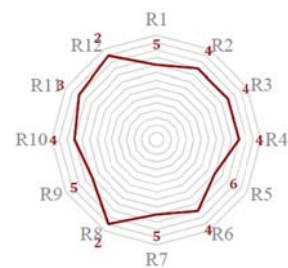
بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)



نیازی و ماین (۲۰۱۶)



اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)

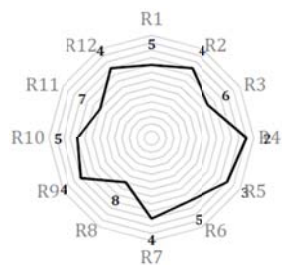


پرایس و واردل (۱۹۸۲)

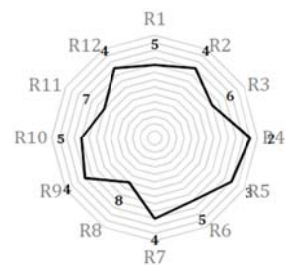
شکل ۱۲. نمودارهای راداری برای هر یک از روش‌های تخمین ظرفیت باربری جدار شمع



کک و ولد (۱۹۹۶)



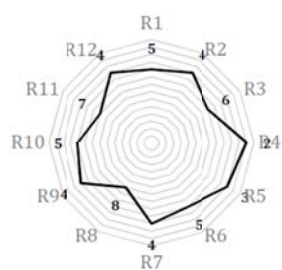
فلمنگ (۱۹۹۲)



مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)



آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)



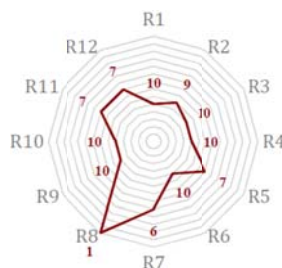
کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)



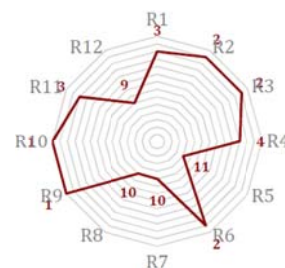
یاردین و همکاران (۲۰۰۵)



دیرویتز و برینجن (۱۹۷۹)



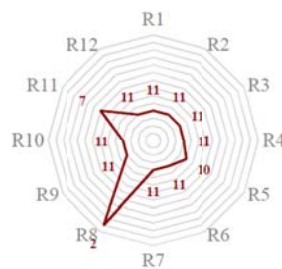
کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)



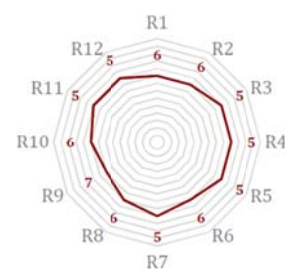
اشمرتمن (۱۹۷۸)



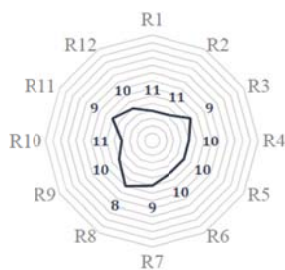
فیلیونات (۱۹۸۰)



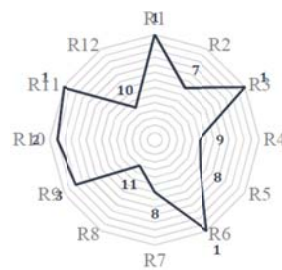
توما و فخر (۱۹۸۲)



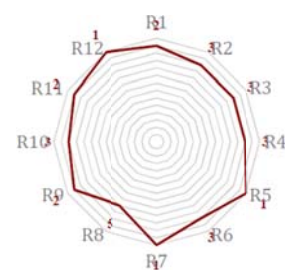
بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)



نیازی و ماین (۲۰۱۶)



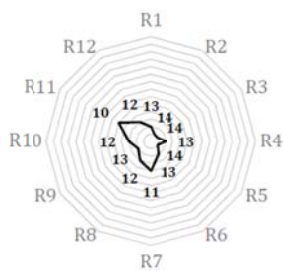
اسلامی و فلینوس (۱۹۹۷)



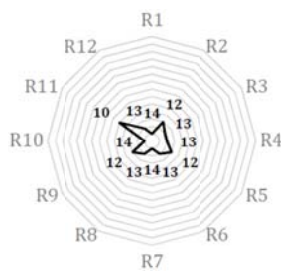
پرایس و واردل (۱۹۸۲)

شکل ۱۳. نمودارهای راداری برای هر یک از روش‌های تخمین ظرفیت باربری نوک شمع

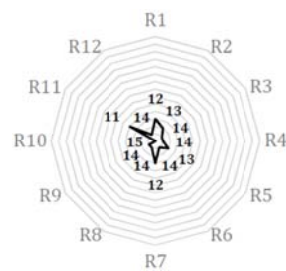




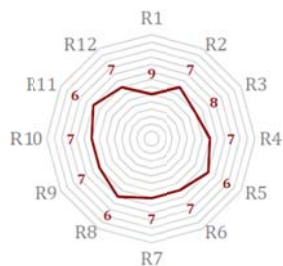
کلک و ولد (۱۹۹۶)



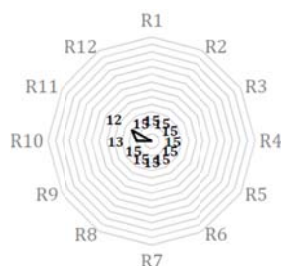
فلمنگ (۱۹۹۲)



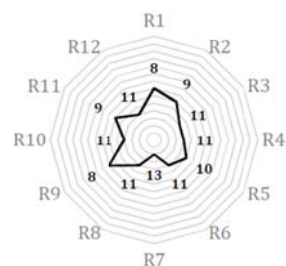
مؤسسه نفت آمریکا (۱۹۹۰)



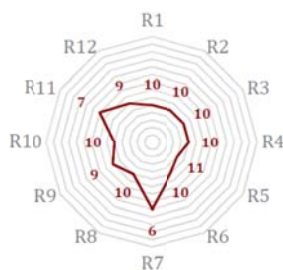
آنوکی و ولسو (۱۹۷۵)



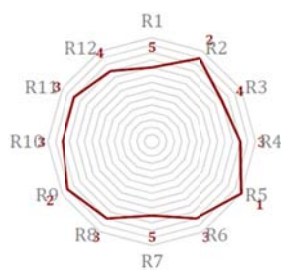
کارلسرود و همکاران (۲۰۰۵)



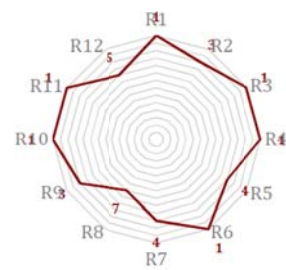
یاردین و همکاران (۲۰۰۵)



دیرویترو و برینجن (۱۹۷۹)



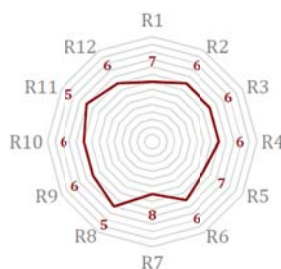
کلیسی و همکاران (۱۹۷۸)



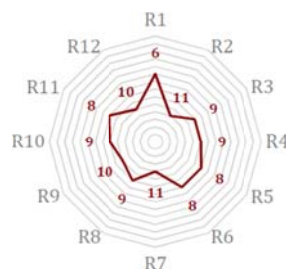
اشمرتمن (۱۹۷۸)



فیلیپونات (۱۹۸۰)



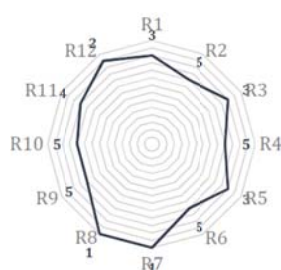
تومای و فخرو (۱۹۸۲)



بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)



نیازی و ماین (۲۰۱۶)



اسلامی و فلینیوس (۱۹۹۷)



پرایس و واردل (۱۹۸۲)

شکل ۱۴. نمودارهای راداری برای هر یک از روش‌های تخمین ظرفیت باربری کل شمع

## ۶- تخمین زمان محتمل گیرش خاک در منطقه مورد

### بررسی

در بخش‌های ۴ و ۵، به بررسی و ارزیابی روش‌های ظرفیت باربری شمع با نتایج آزمایش‌های تحلیل دینامیکی شمع بلافاصله بعد از کوبش پرداخته شده است. به عبارت دیگر، نتایج ارائه شده تاکنون مربوط به ظرفیت باربری روز ابتدایی کوبش شمع‌ها یا ظرفیت باربری کوتاه‌مدت آن‌هاست. این در حالی است که عمدتاً در پروژه‌های عملی، ظرفیت باربری بهره‌برداري و بلندمدت شمع مدنظر است. ظرفیت باربری بلندمدت شمع زمانی است که شمع بیش‌ترین رشد توان باربری بعد از کوبش اولیه را تجربه نموده است (Khanmohammadi and Fakharian, 2019).

هنگام کوبش شمع در خاک اشباع، خاک اطراف شمع جابه‌جا و دست خورده می‌شود و به دنبال آن فشار آب حفره‌ای اضافی خصوصاً در خاک‌های ریزدانه رسی به وجود می‌آید و تنش مؤثر کاهش می‌یابد. با کاهش تنش مؤثر، ظرفیت باربری شمع نیز در طی و انتهای کوبش کاسته می‌شود. با گذشت زمان، فشار آب حفره‌ای اضافی پدید آمده، زائل می‌شود. با محو فشار آب حفره‌ای اضافی، تنش مؤثر و در نتیجه، مقاومت خاک اطراف شمع و ظرفیت باربری شمع افزایش می‌یابد (Augustesen et al. 2006). این فرآیند، اثر زمان بر ظرفیت باربری شمع‌هاست و پدیده مرتبط را گیرش خاک می‌نامند. تحقیقات نشان می‌دهند ظرفیت باربری شمع‌ها در خاک‌های ریزدانه، ممکن است حتی تا ۱۲ برابر ظرفیت باربری در پایان کوبش اولیه نیز برسد (Fakharian et al. 2012). بنابراین، طراحی اقتصادی شمع‌ها مستلزم در نظرگیری رفتار بلند مدت آن‌هاست. از طرفی، برای تخمین میزان گیرش خاک لازم است که آزمایش‌های کنترلی حداقل در دو زمان (بلافاصله بعد از کوبش و بیش‌ترین زمان ممکن بعد از کوبش) انجام شوند. اما ذکر این نکته ضروری است که انجام آزمایش‌های کنترلی در فواصل زمانی طولانی پس از نصب شمع، با توجه به شرایط حاکم بر محیط‌های فراساحل، عملی و اقتصادی نمی‌باشد (Augustesen et al. 2006). به این دلیل و مطابق بررسی‌های انجام شده در ادبیات فنی، اطلاعات مربوط به نتایج آزمایش‌های تحلیل دینامیکی شمع‌های فراساحلی در بلندمدت بسیار کمیاب و حتی می‌توان گفت نایاب هستند. علاوه بر میزان گیرش خاک در بلندمدت، زمان این گیرش نیز پارامتر بسیار مهم

دیگری است که مستقیماً بر ظرفیت باربری شمع‌ها در بلندمدت اثر می‌گذارد. به عبارت دیگر، بررسی این سوال اساسی که پس از چه زمانی، شمع کوبیده شده به ظرفیت باربری پیشینه یا بلندمدت خود می‌رسد، بسیار می‌تواند در بارگذاری و بهره‌برداری از شمع‌ها موثر باشد. بنابراین، در این بخش تلاش می‌شود که زمان گیرش خاک در منطقه خلیج فارس تعیین شود. برای این منظور، از آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی و همچنین روابط تجربی موجود در ادبیات فنی در قالب سه روش زیر کمک گرفته می‌شود.

### ۶-۱- روش اول: به کارگیری نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی

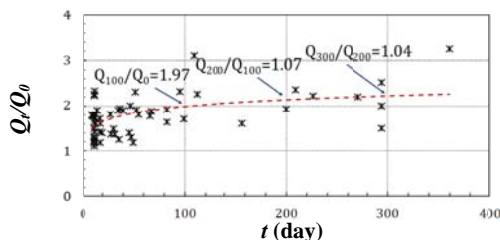
تغییر ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده شده در خاک‌های غالباً رسی با زمان، مطمئناً با زهکشی خاک (تغییر فشار آب حفره‌ای) رابطه مستقیم دارد. از طرفی، زهکشی در این نوع خاک‌ها ارتباط تنگاتنگی با مقوله تحکیم خاک دارد. در تحکیم، آب موجود در حفرات یک خاک رسی اشباع با نفوذپذیری کم به تدریج و با سرعت کم از خاک خارج می‌شود. از زمانی که در اثر فشار سربار وارد بر خاک، اضافه فشار آب حفره‌ای به وجود می‌آید، پدیده تحکیم آغاز و تا زمانی که این اضافه فشار آب حفره‌ای در اثر زهکشی زائل می‌شود، تحکیم ادامه خواهد یافت. برای بررسی درجه تحکیم و محاسبه میزان و سرعت تحکیم، از نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی که به آزمایش ادومتر نیز معروف می‌باشد، استفاده می‌شود. فرم گرافیکی اطلاعات به دست آمده از آزمایش ادومتر، نمودار معروف تغییرات نسبت پوکی نمونه ( $e_{1v}$ ) نسبت به بارهای مؤثر وارده ( $p'$ ) را ارائه می‌دهد. درجه تحکیم ( $U$ ) به صورت تابعی از ضریب زمان ( $T_v$ ) مطابق رابطه ۸ تعریف می‌شود که نقش مهمی در برآورد زمان تحکیم دارد. برای هر درجه تحکیم خاص، یک ضریب زمان نظیر وجود دارد. از بین این مقادیر، ضریب زمان نظیر تحکیم ۹۰٪ حائز اهمیت است که برابر با ۰/۸۴۸ می‌باشد.

$$T_v = \frac{c_v t}{H_{dr}^2} \quad (8)$$

که در آن،  $c_v$  ضریب تحکیم،  $t$  زمان تحکیم و  $H_{dr}$  ضخامت کوتاه‌ترین مسیر زهکشی و خروج آب از خاک می‌باشند. برای تعیین ضریب تحکیم ( $c_v$ )، روش تیلور (روش جذر زمان) برای ۹۰٪ تحکیم وجود دارد. با مشخص بودن



که در ۱۰۰ روز دوم و سوم این نرخ رشد به ترتیب به ۷٪ و ۴٪ تنزل یافته است.



شکل ۱۵. تغییرات ظرفیت باربری کل شمع با گذشت زمان

### ۳-۶- روش سوم: به کارگیری روابط تجربی موجود در ادبیات فنی

برای پیش بینی میزان افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها در گذر زمان، می‌توان از رابطه پیشنهاد شده توسط اسکو و دنور (۱۹۸۸) استفاده نمود. در این رابطه، فرض شده که رابطه‌ی گیرش و لگاریتم زمان، خطی است (Skov and Denver, 1988):

$$\frac{Q_t}{Q_{t_0}} = 1 + A \left[ \log_{10} \frac{t}{t_0} \right] \quad (9)$$

که در آن،  $Q_t$  ظرفیت باربری محوری شمع در زمان  $t$  پس از پایان کوبش شمع،  $Q_{t_0}$  ظرفیت باربری محوری شمع در زمان  $t_0$ ، ضریب گیرش و این ۲ پارامتر، مستقل از یکدیگر (برحسب روز) هستند.

ضریب  $A$ ، تابعی از جنس خاک، جنس شمع، نوع، اندازه و ظرفیت آن است و مستقل از عمق و چگونگی محو فشار آب حفره‌ای اضافی می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار  $A$ ، تابعی از زمان مبنا ( $t_0$ ) می‌باشد و این ۲ پارامتر، مستقل از یکدیگر نیستند. جدول ۷ مقادیر  $t_0$  و  $A$  پیشنهادی سایر محققان را برای خاک‌های رسی نشان می‌دهد (Shamshirgaran and Ebrahimian, 2018). بر اساس جای‌گذاری مقادیر  $t_0$  و  $A$  پیشنهادی پژوهشگران و فرض افزایش ۱۰۰ درصدی نسبت  $Q_t/Q_{t_0}$  در رابطه ۸، مقدار  $t$  قابل محاسبه می‌باشد.

مطابق با جدول ۷، به‌طور میانگین ۱۰۴ روز پس از کوبش اولیه، ظرفیت باربری شمع ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد.

در نهایت، با توجه به نتایج به‌دست آمده از روش‌های اول تا سوم، می‌توان با اطمینان قابل قبولی پیش‌بینی نمود که زمان محتمل گیرش برای خاک در منطقه مورد مطالعه میانگین سه مقدار ۸۵، ۱۰۰ و ۱۰۴ روز یعنی ۹۶/۳ روز یا حدوداً ۱۰۰ روز بعد از کوبش شمع‌هاست.

ضریب زمان ( $T_v$ )، ضریب تحکیم ( $C_v$ ) متناظر با تحکیم ۹۰٪ و ضخامت کوتاه‌ترین مسیر زهکشی شده ( $H_{dr}$ ) و جای‌گذاری در رابطه (۸)، مقادیر زمان تحکیم ( $t_{90}$ ) در مجاورت گمانه‌های ۱ تا ۱۰ مطابق با جدول ۶ به‌دست می‌آیند. با توجه به جدول ۶، به صورت متوسط، نزدیک به ۸۵ روز زمان برای رسیدن به درجه تحکیم ۹۰٪ لازم است.

جدول ۶. مقادیر زمان تحکیم ( $t_{90}$ ) متناظر با تحکیم ۹۰٪

نام گمانه	$H_{dr}$ (m)	$p'$ (MPa)	$e_{vr}$	$C_v(t_{90})$ (m <sup>2</sup> /year)	$t_{90}$ (day)
BH-01	۵۰	۷۷	۰/۴۰	۳۰	۷۰/۶۵
BH-02	۵۱	۷۸	۰/۴۷	۲۸	۷۸/۰۵
BH-03	۵۳/۵	۸۲	۰/۳۹	۲۹	۸۳/۲۶
BH-04	۳۲/۵	۵۰	۰/۴۷	۱۰	۹۰/۶۵
BH-05	۴۹	۷۵	۰/۴۲	۲۰	۹۹/۸۰
BH-06	۳۲	۴۹	۰/۴۹	۱۰	۸۴/۶۰
BH-07	داده‌ای گزارش نشده است.				-
BH-08	داده‌ای گزارش نشده است.				-
BH-09	۴۰	۷۳/۶۴	۰/۴۳	۱۸	۷۳/۶۴
BH-10	۴۵	۸۶/۸۰	۰/۴۵	۲۰	۸۶/۸۰

### ۶-۲- روش دوم: به کارگیری نتایج آزمون‌های صحرائی

با استفاده از آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی شمع می‌توان مقاومت شمع را به‌طور دقیق پس از اجرا و در زمان آزمایش تعیین کرد. جهت محاسبه میزان گیرش خاک لازم است این آزمایش‌ها حداقل دو بار با فاصله زمانی انجام شوند. بهترین زمان‌بندی برای این آزمایش‌ها بدین‌گونه است که اولین آزمایش بلافاصله بعد از کوبش و آزمایش دوم با بیش‌ترین زمان ممکن پس از کوبش صورت گیرد.

شکل ۱۴ نتایج آزمایشات دینامیکی انجام شده بر روی شمع‌های فراساحلی منطقه خلیج فارس-میدان-پارس جنوبی را در گذر زمان نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات ظرفیت باربری کل شمع با زمان پس از کوبش اولیه در ابتدا شیب زیادی دارد ولی با گذشت زمان از شیب نمودار به‌شدت کاسته می‌شود. برای درک بهتر این موضوع، نمودار شکل ۱۴ را به ۳ بازه ۱۰۰ روزه تقسیم و میزان رشد ظرفیت باربری در انتهای ۱۰۰ روز با روز اول آن مقایسه شده است. نمودار نشان می‌دهد، در ۱۰۰ روز اول، ظرفیت باربری شمع نزدیک به ۱۰۰٪ افزایش را تجربه کرده است، این در حالی است

جدول ۷. مقادیر پیشنهادی پارامترهای موثر در رابطه (۸)

$t$ (day)	$Q/Q_0$	$A$	$t_0$ (day)	روش
۴۵	۲	۰/۶	۱	اسکو و دنور (۱۹۸۸)
۱۶۷	۲	۰/۴۵	۱	بولک و همکاران (۲۰۰۸)
۱۰۰	۲	۰/۵	۱	عطار (۲۰۱۳)

## ۷- نتیجه گیری

امروزه، استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا (به‌ویژه CPT و CPTu) به‌همراه داده‌های اندازه‌گیری شده آزمون‌های تحلیل دینامیکی شمع به‌عنوان جای‌گزینی برای روش‌های تحلیل استاتیکی، مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فراساحلی قرار گرفته است. با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های گسترده در این زمینه در سراسر دنیا، در ایران تحقیقات محدودی در خصوص تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فراساحلی تا به امروز انجام پذیرفته است. بر این اساس، مطالعه حاضر می‌تواند گامی به جلو برای تخمین ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های فلزی لوله‌ای فراساحلی منطقه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی با استفاده از نتایج آزمون نفوذ مخروط و همچنین تعیین زمان محتمل گیرش خاک اطراف این شمع‌ها باشد.

در این پژوهش، از یک بانک جامع توسعه یافته داده‌های ژئوتکنیکی شامل آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا، اطلاعات ۱۰ آزمون CPTu در مجاورت ۲۴ شمع فراساحلی استفاده شده است. سپس، ۱۵ روش تخمین ظرفیت باربری شامل ۵ روش مبتنی بر تحلیل استاتیکی، ۸ روش مستقیم مبتنی بر آزمایش CPT و ۲ روش مستقیم مبتنی بر آزمایش CPTu توسعه یافته‌اند. بر اساس روش‌های ۱۵ گانه و بانک اطلاعاتی در دسترس، مقادیر ظرفیت باربری ۲۴ شمع به‌تفکیک مقاومت جدار، نوک و کل محاسبه و با ۱۲ معیار آماری ارزیابی شده‌اند. از نتایج اندازه‌گیری شده حاصل از آزمون‌های تحلیل دینامیکی شمع بلافاصله بعد از کوبش، به‌عنوان آزمایش مرجع برای اعتبارسنجی مقادیر ظرفیت باربری به‌دست آمده از روش‌های ۱۵ گانه استفاده شده است. به‌منظور امتیازدهی نهایی به عملکرد و کیفیت پیش‌بینی روش‌ها، نمودارهای گرافیکی راداری به‌کار گرفته شده‌اند. نتایج ظرفیت باربری شمع‌ها مبتنی بر نتایج مستقیم آزمایش نفوذ مخروط (CPT و CPTu) و تحلیل استاتیکی نشان می‌دهند که پراکندگی بسیاری در پاسخ نهایی حاصل از روش‌ها وجود دارد. دلیل این مسئله می‌تواند تفاوت در فرضیات روش‌ها و شرایط محیطی منحصر به فرد حاکم بر هر

یک از آن‌ها باشد. یکی از راه‌حل‌ها برای رفع این مشکل، ارایه یک رابطه کالیبره شده جدید برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فلزی لوله‌ای فراساحلی در منطقه خلیج فارس است که این موضوع می‌تواند مدنظر محققان در این حوزه قرار گیرد. مقایسه و ارزیابی روش‌های تعیین ظرفیت باربری جدار شمع‌ها نشان می‌دهد که تمامی روش‌های مبتنی بر نتایج CPT و CPTu دارای پراکندگی کمتر و در نتیجه عملکرد بهتری نسبت به روش‌های تحلیل استاتیکی هستند. در بررسی کلی داده‌ها، روش‌های فراساحلی تحلیل استاتیکی تخمین‌های دست بالایی در تعیین ظرفیت باربری جدار در سه حالت کوتاه، میان و بلند مدت ارایه می‌نمایند. تحقیقات آماری نشان می‌دهند که روش‌های تحلیل استاتیکی برای تعیین ظرفیت باربری نوک شمع‌ها در خاک‌های چسبنده از دقت نسبتاً قابل قبولی برخوردارند. میزان دقت و عملکرد روش‌های مستقیم مبتنی بر CPTهای مکانیکی نسبت به روش‌های مستقیم مبتنی بر CPTuهای الکتریکی، در پیش‌بینی ظرفیت باربری کوتاه‌مدت شمع‌ها (بلافاصله بعد از کوبش) بیش‌تر است. دلیل اصلی این است که روش‌های مبتنی بر CPTهای مکانیکی توانایی اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای را ندارند و از تحلیل تنش کل بدون حذف تأثیر فشار آب حفره‌ای در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده می‌کنند. در حالی که تحلیل تنش مؤثر مربوط به روش‌های مبتنی بر CPTuهای الکتریکی، استهلاک فشار آب حفره‌ای را در نظر می‌گیرد که تحلیل آن مناسب برای زمان کوبش نیست. پیش‌بینی می‌شود که تخمین نسبتاً بالای روش‌های CPTu با گذشت زمان کاربردی‌تر از روش‌های CPT به‌ویژه در محیط‌های چسبنده باشد و روش‌های مبتنی بر CPTu، ظرفیت باربری بلندمدت شمع‌ها را با دقت بیشتری برآورد نمایند. در انتها، به‌منظور بررسی تأثیر زمان در افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها و تعیین زمان محتمل گیرش خاک برای منطقه مورد مطالعه، با به‌کارگیری نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی (آزمایش تحکیم) و صحرایی (آزمون تحلیل دینامیکی شمع) و روابط تجربی موجود در ادبیات فنی در حوزه خلیج فارس - میدان پارس جنوبی، نتیجه‌گیری شده است که تقریباً با گذشت زمان ۱۰۰ روز پس از کوبش اولیه، ظرفیت باربری شمع تقریباً به میزان ۱۰۰ درصد افزایش را تجربه می‌کند. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند توسط محققان و متخصصان فعال در حوزه ژئوتکنیک جهت کاهش ریسک‌های احتمالی در پروژه‌های فراساحلی ایران به‌خصوص منطقه خلیج فارس مورد استفاده قرار گیرد.

## ۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی		علائم یونانی	
$A_b$	سطح مقطع خارجی نوک شمع، مترمربع	$\alpha$	فاکتور چسبندگی در روش تنش کل
$AR$	نسبت سطح، درصد	$\alpha^{NC}$	فاکتور چسبندگی در خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته
$C_b$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد نوک شمع	$\beta_{min}$	حدافل مقدار مجاز در فاکتور ظرفیت باربری جدار در روش تنش مؤثر
$C_{be}$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد نوک شمع در روش نیازی و ماین	$\delta_{r\Box}$	زاویه اصطکاک برشی بین شمع و خاک در نقطه شکست، درجه
$CI$	فاصله اطمینان	$\theta_2$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع وابسته به جهت بارگذاری
$CL$	سطح اطمینان	$\theta_3$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع وابسته به نرخ بارگذاری
$C_s$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع	$\sigma$	انحراف از معیار
$C_{se}$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع در روش نیازی و ماین	$\sigma_g$	انحراف از معیار هندسی
$c_v$	ضریب تحکیم، مترمربع بر سال	$\sigma_{re}$	تنش مؤثر شعاعی جدار شمع پس از نصب، مگاپاسکال
$D$	قطر خارجی شمع، متر	$\mu$	میانگین حسابی
$e_{vr}$	تخلخل نمونه	$\mu_g$	میانگین هندسی
$e$	عدد لگاریتم طبیعی (نپر)، معادل ۲/۷۱۸	$\pi$	عدد پی، معادل ۳/۱۴
$F_b$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد نوک شمع	$\theta_1$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع وابسته به نوع شمع
$f_s$	تنش اصطکاکی جداره مخروط CPTu، کیلوپاسکال	$\sigma'_{rf}$	تنش مؤثر شعاعی جدار شمع در نقطه شکست، مگاپاسکال
$F_s$	فاکتور اصلاحی مقاومت واحد جدار شمع	$\sigma'_{r0}$	تنش مؤثر قائم اولیه بر جدار شمع، مگاپاسکال
$F_{tip}$	ضریب اصلاحی نوک شمع	$\psi$	ضریب مقاومت
$HD$	توزیع هیستوگرام		
$H_{dr}$	ضخامت کوتاه‌ترین مسیر زهکشی و خروج آب از خاک، متر		
$i$	شماره مورد محاسبه فاکتور احتمال تجمعی		
$I_p$	نشانه خمیری خاک رس، درصد		
$IQR$	دامنه میان چارگی		
$K_c$	ضریب فشار زمین، کیلوپاسکال		
$L$	طول شمع، متر		
$M$	میان		
$n$	تعداد کل داده‌های ورودی در فاکتور احتمال تجمعی		
$N_c$	ضریب چسبندگی		
$N_k$	ضریب مخروط آزمایش نفوذ مخروط		
$OCR$	نسبت پیش تحکیمی		
$P_t$	فاکتور احتمال تجمعی، درصد		
$P_{50}$	میزان احتمال وقوع ۵۰٪ در فاکتور احتمال تجمعی، درصد		
$P_{90}$	میزان احتمال وقوع ۹۰٪ در فاکتور احتمال تجمعی، درصد		
$P'$	بار مؤثر وارد بر نمونه، کیلوپاسکال		
$PDF$	تابع چگالی احتمال		
$P_{out}$	محیط خارجی نوک شمع، متر		
$q_b$	مقاومت واحد نوک شمع، مگاپاسکال		
$Q_b$	مقاومت نوک شمع، MN		
$q_c$	تنش نوک مخروط CPTu، مگاپاسکال		
$q_{c.avg(side)}$	میانگین مقادیر تنش نوک مخروط CPTu در محدوده جداره شمع، مگاپاسکال		
$q_{c.avg(tip)}$	میانگین مقادیر تنش نوک مخروط CPTu در محدوده نوک شمع، مگاپاسکال		
$q_E$	تنش مؤثر نوک مخروط CPTu، مگاپاسکال		
$Q_m$	مقاومت اندازه‌گیری شده (مرجع) شمع توسط آزمایش دینامیکی شمع، MN		
$Q_p$	مقاومت تخمین زده شده شمع توسط روش‌های تجربی، MN		
$Q_{fit}/Q_m$	معادله بهترین خط گذرا از مبدأ		
$Q_p/Q_m$	پارامتر مدل		
$q_s$	مقاومت واحد جدار شمع، مگاپاسکال		

Persian Gulf – A Case Study”. 13th International Conference on Coasts, Ports and marine structures, pp. 249-250.

-Ebrahimian, B., Movahed, V. and Nazari, A., (2014). “Soil characterisation of South Pars field, Persian Gulf. Environmental Geotechnics”, 1(2), pp.96-107.

-Ebrahimian, B., Movahed, V. and Pasha, A.Y., (2012), “Evaluation of undrained shear strength of marine clay using cone penetration resistance at South Pars field in Iran”, Ocean engineering, 54, pp.182-195.

-Ebrahimian, B., Nazari, A. and Pasha, A.Y., (2015), “Evaluating  $\epsilon_{50}$  for lateral load-displacement behavior of piles in clay”, Ocean Engineering, 96, pp.149-160.

-Eslami, A. and Fellenius, B.H., (1997), “Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories”, Canadian Geotechnical Journal, 34(6), pp. 886-904.

-Eslami, A. and Fellenius, B.H., (2004), “CPT and CPTu data for soil profile interpretation: review of methods and a proposed new approach”.

-Eslami, A., Aflaki, E. and Hosseini, B., (2011), “Evaluating CPT and CPTu based pile bearing capacity estimation methods using Urmiyeh Lake Causeway piling records”, Scientia Iranica, 18(5), pp.1009-1019.

-Fakharian, K., Bahrami, T., Esmaili, F. and Hosseinzadeh Attar, I., (2012), “Dynamic and Static Tests for Optimization of Spun Piles of a Utility Plant near Persian Gulf-Case Study”, In The 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations, pp. 18-20.

-Haustorfer, I.J. and Plesiotis, S., (1988). “Instrumented dynamic and static pile load testing at two bridge sites”. In Fifth Australia-New Zealand conference on geomechanics: prediction versus performance; preprints of Papers, Institution of Engineers, Australia.

-Khanmohammadi, M. and Fakharian, K., (2017), “Numerical modelling of pile installation and set-up effects on pile shaft capacity”, International Journal of Geotechnical Engineering.

## ۹- مراجع

- شمشیرگران، ا.ح. و ابراهیمیان، ب. (۱۳۹۹)، " ارزیابی

ظرفیت باربری فشاری شمع‌های طولی فولادی کوبشی فراساحلی در منطقه خلیج فارس"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران.

- فاخر، ع.، خوشبخت مروی، م.، م. و معرفت، م.، ص.

(۱۳۸۹)، "دقت نتایج ظرفیت باربری شمع حاصل از اندازه

گیری‌های دینامیکی با استفاده از روش "PDA. مجله

مهندسی عمران شریف، دانشگاه صنعتی شریف، تهران،

ایران.

-Abu-Farsakh, M.Y. and Titi, H.H., (2004),

“Assessment of direct cone penetration test

methods for predicting the ultimate capacity

of friction driven piles”, Journal of

Geotechnical and Geoenvironmental

Engineering, 130(9), pp.935-944.

-ASTM D1143, (2020), “Standard Test

Methods for Deep Foundation Elements

Under Static Axial Compressive Load”,

ASTM International, West Conshohocken,

PA.

-ASTM D3441, (2016), “Standard Test

Method for Mechanical Cone Penetration

Testing of Soils”, ASTM International,

West Conshohocken, PA.

-ASTM D5778, (2020), “Standard Test

Method for Electronic Friction Cone and

Piezcone Penetration Testing of Soils”,

ASTM International, West Conshohocken,

PA.

-Augustesen, A., (2006). “The Effects of

Time on Soil Behaviour and Pile Capacity”,

PhD Thesis defended public at Aalborg

University, 2006.

-Cai, G., Liu, S. and Puppala, A.J., (2012).

“Reliability assessment of CPTU-based pile

capacity predictions in soft clay deposits”.  
Engineering geology, 141, pp. 84-91.

-Ebrahimian, B. and Movahed, V., (2017),

“Application of an evolutionary-based

approach in evaluating pile bearing capacity

using CPT results”, Ships and Offshore

Structures, 12(7), pp.937-953.

-Ebrahimian, B. and Shamshirgaran, A. H.,

(2018), “Axial Compression Bearing

Capacity of Driven Offshore Piles in the

A Case Study”, the 3rd Iranian Conference on Geotechnical Engineering.

-Shamshirgaran, A. H. and Ebrahimian, B., (2019), “Evaluating in-situ and analytical pile bearing capacity estimation methods using well-documented piling records”, 8th International Offshore Industries Conference, Sharif University of Technology, Tehran.

-Skov, R. and Denver, H., (1988). “Time-dependence of bearing capacity of piles”, In Proc. Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Ottawa, pp. 25-27.

-Tand, K.E. and Funegard, E.G., (1989), “Pile capacity in stiff clays: CPT method”, In Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations, 12, pp. 349-352.

-Titi, H., Abu-Farsakh, M. and Tumay, M., (1999), “Evaluation of pile load tests in soft cohesive Louisiana soils”. In Analysis, Design, Construction, and Testing of Deep Foundations, ASCE., pp. 296-308.

-Wang, Z., Zhang, N., Cai, G., Li, Q. and Wang, J., (2017), “Assessment of CPTU and static load test methods for predicting ultimate bearing capacity of pile”, Marine Georesources & Geotechnology, 35(5), pp.738-745.

-Lacasse, S., Nadim, F., Knudsen, S., Eidsvig, U.K., Liu, Z.Q., Yetginer, G. and Guttormsen, T.R., (2013), “Reliability of axial pile capacity calculation methods”, In GéoMontréal 67th Canadian Geotechnical Conference.

-Lunne, T., Powell, J.J. and Robertson, P.K., (2002), “Cone penetration testing in geotechnical practice”, CRC Press.

-Niazi, F.S. and Mayne, P.W., (2013), “Cone penetration test based direct methods for evaluating static axial capacity of single piles”, Geotechnical and Geological Engineering, 31(4), pp.979-1009.

-Niazi, F.S., (2014), “Static axial pile foundation response using seismic piezocone data”, Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology.

-Rausche, F., Goble, G.G. and Likins Jr, G.E., (1985), “Dynamic determination of pile capacity”, Journal of Geotechnical Engineering, 111(3), pp.367-383.

-Robertson, P.K., (1990), “Soil classification using the cone penetration test”, Canadian Geotechnical Journal, 27(1), pp. 151-158.

-Shamshirgaran, A. H. and Ebrahimian, B., (2018). “Time Effects on the Axial Compression Bearing Capacity of Piles Driven in Offshore Clays of Persian Gulf –

# Bearing Capacity Analysis of Offshore Piles in the Persian Gulf using CPT Results and Time Effect Consideration

*Amir Hossein Shamshirgaran, M.Sc., Grad., Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran.*

*Babak Ebrahimian, Assistant Professor, Geotechnical and Transportation Engineering Department, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran.*

*E-mail: b\_ebrahimian@sbu.ac.ir*

Received: March 2023- Accepted: August 2023

## **ABSTRACT**

Steel pipe piles are used as the foundation of marine structures such as bridges, hydrocarbon extraction platforms, wind turbines and anchoring elements. Due to the importance and high construction cost of these structures, any weakness and failure in their pile foundations can lead to catastrophic economic, environmental and social damages. Therefore, accurate analysis, safe design and reliable determination of their bearing capacities are of particular importance. In this study, the compressive axial bearing capacity of 24 long offshore driven steel pipe piles in the cohesive sediments of the Persian Gulf is estimated using 10 methods based on direct results of cone penetration test (CPT and CPTu) and 5 methods based on static analysis. The bearing capacity values obtained from these methods are compared and validated with the corresponding measured data attained from the pile dynamic analysis tests. Then, the performance of these methods are analyzed in terms of accuracy and quality of predicting shaft, tip and total bearing capacities based on 12 statistical criteria. Subsequently, the probable time of soil set-up around the offshore piles in the Persian Gulf is estimated using laboratory and field tests as well as the empirical relationships available in the technical literature. It is shown that the piles installed in the considered area will have the highest growth of bearing capacity after about 100 days from the initial driving and reach their maximum or long-term bearing capacities.

**Keywords:** Long Offshore Pile, Compressive Bearing Capacity, In-Situ Test, Statistical Analysis, Time Effect, Soil Set-Up, Persian Gulf