

دقت نتایج ظرفیت باربری شمع حاصل از اندازه‌گیری‌های دینامیکی با استفاده از روش PDA

محمد مهدی خوشبخت مروی (کارشناس ارشد)

علی فاخر (دانشیار)

محمد صادق معرفت (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

آزمون‌گر دینامیکی شمع با استفاده از (PDA)^۱، امروزه به منزله‌ی روشی جدید در تخمین ظرفیت باربری شمع استفاده می‌شود. در حال حاضر، تطابق اطلاعات نمودار نیرو-زمان محاسبه شده با اطلاعات ثبت شده و انتخاب متغیرهای مقاومتی خاک، با استفاده از نرم‌افزار مکمل آن (CAPWAP)^۲، برای به دست آوردن ظرفیت باربری شمع روندی تجربی است. لذا با در نظر گرفتن طبیعت آزمون و خطای موجود در الگوریتم برنامه و تنوع در تعداد متغیرهای مؤثر خاک که CAPWAP در طی فرآیند به دست آوردن بهترین تطابق از آن استفاده می‌کند، ممکن است با انتخاب متغیرهای مختلف به شاخص تطابق یکسان با نتایج ظرفیت باربری متفاوت دست یافت. در بخش اول سعی شده است میزان تغییر در متغیرهای مختلف خاک و اثر آن روی توزیع ظرفیت باربری بین جدار و نوک شمع و ظرفیت باربری کلی، با هدف رسیدن به شاخص تطابق مشابه برای یک اندازه‌گیری مشخص، بررسی شوند. همچنین در ادامه، تجزیه و تحلیل اطمینان‌پذیری روی نمونه‌های مورد مطالعه انجام شده است. در این تجزیه و تحلیل با استفاده از روش طراحی ضرایب بار و مقاومت و با در نظر گرفتن نتایج حاصل از دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی روی نمونه‌ی معین، یک شاخص اطمینان‌پذیری در برابر بارگسیختگی حاصل از تحلیل استاتیکی به دست آمده و همچنین اثر تغییر نتایج PDA روی شاخص اطمینان‌پذیری محاسباتی و همچنین تراز ایمنی طرح بررسی شده است.

واژگان کلیدی: آزمون دینامیکی شمع، PDA، CAPWAP، ظرفیت باربری، اطمینان‌پذیری.

۱. مقدمه

انجام آزمایش بر جای تعیین ظرفیت باربری شمع به منزله‌ی بخشی از طراحی و اجرای سازه‌های متکی به شمع به شمار می‌رود. حدود و روش انجام این آزمون به تجربه‌ی فرد در زمینه‌ی شمع‌کوبی در شرایط زمین‌شناسی مشخص و هزینه‌ی انجام عملیات بستگی دارد. آزمون بارگذاری استاتیکی به منزله‌ی معتبرترین روش برای بررسی رفتار شمع در نظر گرفته می‌شود، اما بسیار پرهزینه و زمان‌بر است و در بعضی موارد مانند سازه‌های فراساحل، فراهم آوردن شرایط لازم برای انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی ناممکن به نظر می‌رسد. آزمون دینامیکی شمع، با استفاده از PDA، روشی جدید در تخمین ظرفیت باربری شمع است که اساس کار آن در تخمین اولیه‌ی ظرفیت باربری با استفاده از تحلیل معادله‌های دینامیکی انتشار موج یک جهته در طول یک میله است. مکمل این دستگاه، برنامه‌ی مبتنی بر روش اجزاء محدود با عنوان CAPWAP است که با در نظر گرفتن معادله‌های تحلیل موج، شمع را به یک سری

تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۶/۴، داوری ۱۳۸۷/۵/۱۵، پذیرش ۱۳۸۷/۱۱/۲۶.

می‌شود و در نهایت از آن برای ارزیابی ظرفیت باربری شمع و توزیع مقاومت خاک در طول شمع با استفاده از روش‌های تطابق علامه و همچنین به دست آوردن متغیرهای دینامیکی خاک برای استفاده در تحلیل معادله‌ی موج استفاده می‌شود.

یک سیستم آزمون دینامیکی با کمینه‌ی دو حس‌گر کرنش سنج (S_1, S_2) و دو حس‌گر شتاب‌سنج (A_1, A_2) در امتداد یک قطر شمع و به صورت ضربدری در دو طرف آن نصب می‌شوند تا بتوان آثار یک‌نواخت نبودن ضربه‌ی چکش‌شی و تنش‌های خمشی ایجاد شده در شمع را بررسی کرد. حس‌گرهای مذکور معمولاً در عمقی برابر با دو تا سه برابر قطر زیر سر شمع نصب می‌شوند و تقریباً هر نوع شمعی (بتنی، فولادی لوله‌یی، فولادی H شکل، بتنی پیش‌تنیده، چوبی و...) را می‌توان با استفاده از این سیستم آزمایش کرد.

این دستگاه، مقادیر کرنش و شتاب مربوط به موج انتقال‌یافته‌ی درون شمع ناشی از هر ضربه‌ی چکش را ثبت کرده و با داشتن مدول کشسانی و مساحت مقطع شمع، آنها را طبق رابطه‌های زیر به ترتیب به نیرو و سرعت تبدیل می‌کند:

$$F(t) = EA\varepsilon(t) \quad (1)$$

$$V(t) = \int ad(t) \quad (2)$$

در رابطه‌های ۱ و ۲، E مدول کشسانی شمع، A مساحت مقطع شمع و F و V به ترتیب نیرو و سرعت موج انتقال‌یافته‌ی درون شمع هستند.

در زمان کوبش، دستگاه PDA کلیه‌ی انتگرال‌گیری‌ها و محاسبه‌های لازم برای تحلیل رکوردها را برای تعیین میزان انرژی انتقال یافته از چکش به شمع، تنش‌های ایجاد شده در زمان کوبش، کنترل سلامت شمع و مهم‌تر از همه، تخمین اولیه‌ی ظرفیت باربری با استفاده از معادله‌های روش استاندارد کیس^[۱] را انجام می‌دهد:

$$R_s = (\lambda - J_c)[P_\lambda + ZV_\lambda]/2 + (\lambda + J_c)[P_\lambda - ZV_\lambda]/2 \quad (3)$$

$$Z = EA/C \quad (4)$$

در معادله‌های ۳ و ۴، R_s ظرفیت باربری استاتیکی شمع به روش کیس؛ J_c میرایی بدون بعد کیس که محدوده‌هایی به صورت تجربی برای تعیین آن در خاک‌های مختلف

پیاده‌سازی شده در دستگاه، با عنوان PDA-W به دست آمد. سپس، برای رسیدن به بهترین هم‌پوشانی بین نمودارهای محاسباتی و ثبت شده، با هدف دستیابی به شاخص تطابق (MQ)^۲ مشابه، سه تحلیل مجزای CAPWAP بر روی هر یک از رکوردهای ثبت شده انجام شد تا با توجه به روند سعی و خطای موجود در حل معادله‌های حاکم بر تحلیل، میزان تغییر در متغیرهای مختلف خاک، توزیع ظرفیت باربری بین جدار و نوک شمع، ظرفیت باربری کلی شمع و در نهایت دقت نتایج این آزمون برای رکوردی مشخص بررسی شود. در بخش دوم تحقیق نیز با داشتن نتایج طراحی استاتیکی با استفاده از فرمول‌های تجربی و همچنین نتایج آزمون PDA شمع‌های مورد مطالعه، از روش آماری درجه‌ی اول مطالعه‌ی اطمینان‌پذیری (FORM)^۴ استفاده و اطمینان‌پذیری نتایج طرح با فرمول‌های استاتیکی با استفاده از نتایج PDA در مطالعه‌ی آماری بررسی شده است.

۲. تحقیقات پیشین

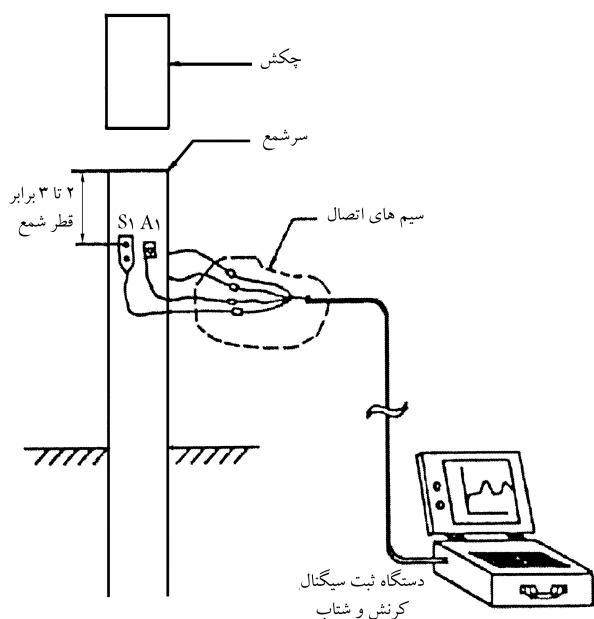
علی‌رغم جدید بودن نسبی آزمایش دینامیکی شمع، تحقیق‌های زیادی در این زمینه صورت گرفته است. البته بیشتر این تحقیق‌ها در زمینه‌ی مبانی و معادله‌های تئوری موضوع و ارزیابی صحت نتایج حاصل از استفاده‌ی آنها در برنامه، مقایسه‌ی نتایج آزمون بارگذاری استاتیکی و دینامیکی برای بررسی دقت نتایج آزمون دینامیکی، مفاهیم فیزیکی پارامترها، منابع خطا در هنگام انجام آزمایش و بررسی محدوده‌ی تغییرات پارامترهای مؤثر برای خاک‌های مختلف بوده است. برای مثال، محققان علاوه بر مقایسه‌ی نتایج آزمون دینامیکی PDA و آزمون استاتیکی و همچنین ارزیابی رابطه‌های همبستگی مورد استفاده در CAPWAP، محدوده‌ی برای متغیرهای اصلی ورودی نرم‌فزار ارائه کرده‌اند.^[۱] و برخی دیگر به ارزیابی تطابق علامه با استفاده از روش اتوماتیک برنامه‌ی CAPWAP پرداخته^[۲] و نیز سعی در بیان مفهوم فیزیکی از میرایی روش کیس (Case damping) در دینامیک شمع داشته‌اند.^[۳]

همچنین در ایران نیز مطالعاتی بر روی آزمون دینامیکی شمع انجام شده است. برای مثال می‌توان به بیان کاربردهای عملی و بیان چندین آزمون PDA انجام شده در جنوب کشور برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی شمع حین کوبش اشاره کرد.^[۴] محققان عوامل مؤثر در دقت نتایج آزمون دینامیکی PDA، مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با فرمول‌های دینامیکی و شرایط دستیابی به نتایج دقیق‌تر در این آزمون را ارزیابی کرده^[۵] و برخی در نوشتاری دیگر با استفاده از نتایج چندین آزمون PDA انجام شده در جنوب کشور و مقایسه‌ی نتایج آن با روابط دینامیکی کوبش شمع، رابطه‌ی تقریبی برای تخمین ظرفیت باربری شمع به دست آورده‌اند.^[۶]

تاکنون مطالعات چندانی در باره‌ی اعتمادپذیری نتایج PDA (براساس آنچه مورد نظر این مطالعه است) انجام نشده است.

۳. تعیین ظرفیت باربری شمع با روش دینامیکی

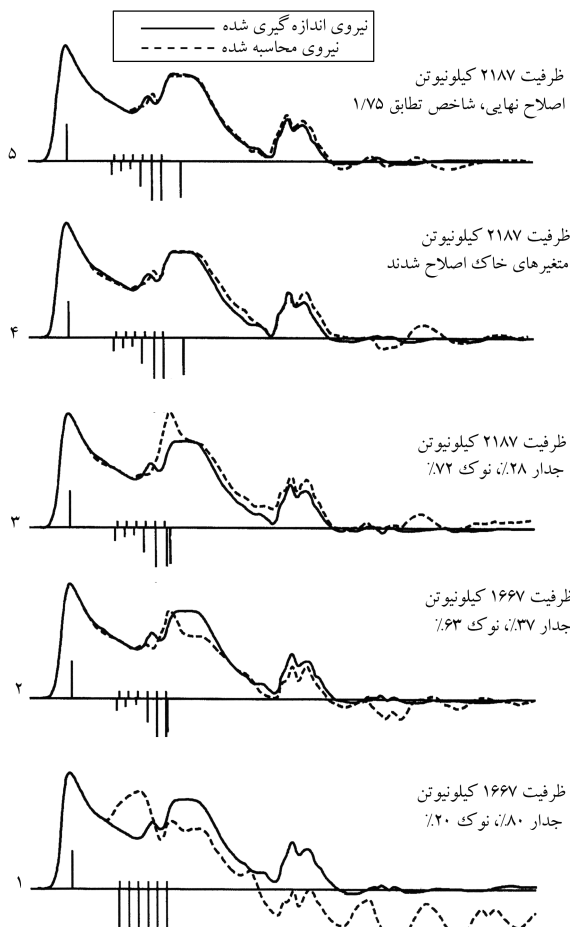
روش‌های آزمون دینامیکی از ثبت اطلاعات کرنش و شتاب حاصل از حس‌گرهایی که در نزدیکی سر شمع نصب می‌شوند، استفاده می‌کنند. (شکل ۱) از این اطلاعات در ابتدا برای ارزیابی کارایی چکش شمع‌کوبی، تنش‌های ایجاد شده در شمع در زمان کوبش، سلامت شمع و تخمین اولیه‌ی ظرفیت باربری استاتیکی شمع استفاده



شکل ۱. ابزارگذاری شمع برای انجام آزمون PDA.

مورد نیاز، نیروی تعادلی سر شمع (F_c) را که با نیروی (F_m) (که دستگاه PDA آن را ثبت کرده است) سنجش پذیر است، به دست می آورد. در ابتدا دو نیروی F_c و F_m با هم برابر نخواهند بود. لذا اصلاحات مورد نظر روی فرضیات مدل خاک و توزیع مقاومت باید آن قدر صورت گیرد و این روند سعی و خطا آن قدر تکرار شود تا در نهایت مقادیر نیروی محاسبه شده (F_c) و نیروی ثبت شده (F_m) تا حد امکان با هم یکسان شوند و عملیات تطابق علام (Signal Matching) محاسبه شده و اندازه گیری شده پایان یابد (شکل ۲).

برنامه با هر تحلیل کیفیت تطابق علام را با مجموع قدرمطلق تفاوت نسبی بین موج محاسبه شده و اندازه گیری شده ارزیابی می کند و در نهایت کیفیت تطابق مربوط به هر تحلیل را با عددی به نام شاخص تطابق (MQ) نشان می دهد (شکل ۳). براساس این روند و از طریق عملیات آزمون و خطا، آن قدر مدل خاک اصلاح می شود تا جایی که اصلاح بیشتر نیروهای محاسبه شده و اندازه گیری شده سر شمع ممکن نباشد. در نهایت مدل به دست آمده از خاک به منزله بهترین تخمین از توزیع مقاومت خاک، ظرفیت باربری نهایی، مشخصه های میرایی، بیشینه تغییر مکان کشسان خاک و دیگر متغیرهای خاک معرفی می شوند.^[۸] این تذکر لازم است که متغیر شاخص تطابق تابعی از مقدار اولیه در اولین تجزیه و تحلیل نیست و در نهایت بایستی به کمینه ای مورد قبول برسد. مهم ترین خروجی های تحلیل، نمودار باربری استاتیکی و توزیع مقاومت در جدار و نوک شمع خواهند بود.



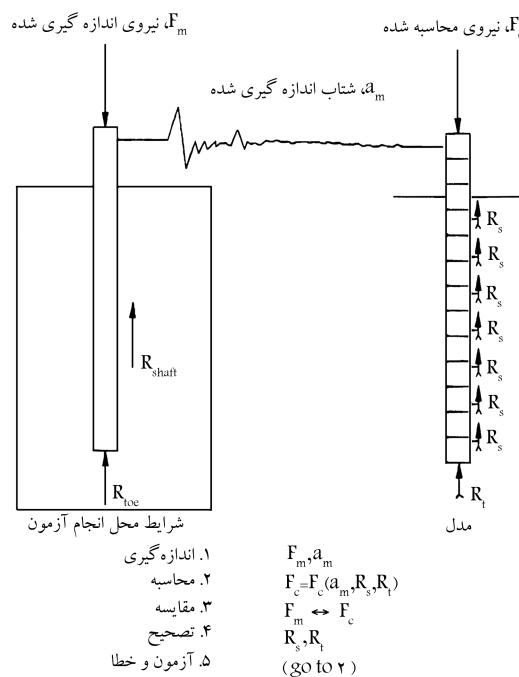
شکل ۳. مثالی از روند سعی و خطا در تحلیل.

پیشنهاد شده است؛ V_1 و V_2 سرعت ثبت شده ناشی از ضربه ای چکش در محل حس گرها، به ترتیب در زمان زدن ضربه و $2L/C$ پس از زدن ضربه ای چکش هستند؛ P_1 و P_2 نیروی ثبت شده ناشی از ضربه ای چکش در محل حس گرها، به ترتیب در زمان زدن ضربه و $2L/C$ پس از زدن ضربه ای چکش هستند؛ $2L/C$ زمانی که طول می کشد تا موج ایجاد شده بر اثر ضربه ای چکش به نوک شمع رفته و دوباره به محل حس گرها بازگردد. L طول شمع زیر حس گرها و C سرعت حرکت موج در مصالح شمع است؛ Z مقاومت ظاهری (Impedance) شمع؛ A و E به ترتیب مساحت مقطع و مدول کشسانی شمع هستند.

در ادامه، نمودارهای نیرو - زمان و سرعت - زمان ضبط شده از هر حس گر برای تعیین دقیق تر ظرفیت باربری به نرم افزار CAPWAP انتقال می یابند. CAPWAP نرم افزاری مبتنی به روش اجزاء محدود، برای ارزیابی دقیق ظرفیت باربری استاتیکی شمع و توزیع مقاومت بین جدار و نوک و همچنین به دست آوردن متغیرهای مشخصه ای خاک مانند میرایی و بیشینه تغییر مکان کشسان خاک (Quake) است. این نرم افزار طی یک روند آزمون و خطا، از معادله ای موج، مدل خاک و روش اجزاء محدود برای تحلیل دقیق استفاده می کند. در این پردازش مقادیر نیرو و سرعت ثبت شده در حس گره های دستگاه PDA در حکم شرایط مرزی سر شمع جایگزین مدل چکش می شوند.

در این روش، همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شمع با یک سری اجزاء پیوسته ای مدل شده، مقاومت استاتیکی خاک با یک سری فنرهای کشسان خمیری و مقاومت دینامیکی با یک سری میراگر متصل به هر المان شمع مدل می شود. از نیرو و سرعت ثبت شده در دستگاه PDA برای ارزیابی نیرو و حرکت شمع استفاده می شود. در نهایت فرآیند تحلیل به شرح زیر است:

در ابتدا از توزیع مقاومت خاک و متغیرهای میرایی و بیشینه تغییر مکان کشسان خاک تخمین منطقی می شود. سپس با استفاده از شتاب اندازه گیری شده (a_m)، مدل حرکت شمع در اثر ضربه ایجاد می شود. پس از آن برنامه با فرض متغیرهای



شکل ۲. فرآیند تطابق سیگنال ها در CAPWAP.

۴. مطالعه‌ی میزان تأثیر متغیرهای مختلف بر نتایج

PDA

روش تحقیق ارائه شده در این قسمت از نوشتار، مشابه کار انجام شده، در باره‌ی اثر متغیرهای مختلف در نتایج فرمول هیلی با اندازه‌گیری بر جهندگی است.^[۹] لیکن به دلیل پیچیدگی و تداخل اثر متغیرهای مختلف در آزمایش دینامیکی، بررسی اثر متغیرهای گوناگون در این تحقیق، مستلزم محاسبات رفت و برگشتی مفصل است. برای بررسی دقت نتایج تحلیل آزمون دینامیکی با استفاده از CAPWAP، ابتدا تعداد زیادی رکورد ثبت شده از این آزمون برای شمع‌های بتنی و فلزی کوبیده شده در خاک‌های مختلف، در نرم‌افزار PDA-W بررسی شدند. سپس، با اطمینان از اینکه رکوردهای مورد نظر چه از لحاظ نصب و کالیبره بودن حس‌گرها و چه از لحاظ وجود خرابی و یا یکنواخت نبودن بدنه‌ی شمع، بدون خطا در هنگام ثبت علائم سرعت و شتاب هستند و همچنین پس از کنترل مجاز بودن تنش‌های بیشینه‌ی فشاری و کششی ایجاد شده در شمع، تعداد ۱۱ رکورد که ۹ مورد اول آن مربوط به آزمایش‌های شرکت PDI و نمونه‌های ۱۰ و ۱۱ از آزمون‌های مهندسان مشاور ساحل در بندرهای خدماتی و پتروشیمی واقع در عسلویه است، برای تحلیل‌های بعدی انتخاب شدند. مشخصه‌های موارد ذکر شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

در مرحله‌ی بعد، اندازه‌گیری مربوط به هر نمونه در نرم‌افزار CAPWAP تحلیل شد تا شاخص تطابق مناسب، برای تخمین ظرفیت باربری شمع به دست آید، که البته این کار مستلزم محاسبات رفت و برگشتی مفصل است. تحلیل اشاره شده در بالا برای هر نمونه‌ی مورد آزمایش ۳ مرتبه، با تغییر متغیرهای ورودی و با هدف رسیدن به شاخص تطابق یکسان تکرار شد تا در نهایت میزان تغییر در نتایج به دست آمده از متغیرهای خاک، توزیع مقاومت در جدار، بین جدار و نوک و سرانجام تغییر در ظرفیت باربری کلی شمع برای آن رکورد مشخص شود. در آخر با داشتن مقادیر

جدول ۱. مشخصه‌های شمع‌های مورد مطالعه.

نمونه	شمع	عمق نفوذ (متر)	خاک
۲۰۱	بتنی - مربعی به عرض ۱۶ اینچ	۲۱	لای
۴۰۳	فولادی-لوله‌یی به قطر ۱۴ اینچ	۲۲٫۵	لای با تراکم متوسط روی لایه‌ی متراکم آبرفتی
۶۰۵	بتنی - هشت ضلعی (اکتاگنال) به قطر ۲۴ اینچ	۲۱٫۳	لای و رس
۷	فولادی - لوله‌یی ته بسته به قطر ۱۰/۷۵ اینچ	۲۳٫۲	لایه‌ی ضعیف ماسه رس دار و لای دار روی سنگ آهک
۸	فولادی - H، ۱۲*۷۴ اینچ	۸٫۲	لای رس دار روی شیل هوازده
۹	فولادی - لوله‌یی به قطر ۲۸ اینچ	۳۳٫۵	رس
۱۱ و ۱۰	فولادی - لوله‌یی به قطر ۵۶ اینچ	۲۱٫۲	ماسه-گراول

نهایی تحلیل، در باره‌ی دقت نتایج به دست آمده از آزمون دینامیکی شمع با استفاده از PDA نتیجه‌گیری خواهد شد.

باید در نظر داشت که در هر تحلیل بسته به مورد، بیش از ۱۲ متغیر مؤثر خاک وجود دارد که تغییر صرفاً یک یا چند متغیر برای رسیدن به شاخص تطابق مورد نظر، احتمالاً منجر به ایجاد خطای فاحش در سایر متغیرها می‌شود. لذا تغییر متغیرهای خاک مانند میرایی خاک (Soil Damping)، بیشینه‌ی تغییرمکان المان خاک (Quake)، میرایی شمع (Pile Damping) و متغیرهای مربوط به باربرداری شمع و همچنین توزیع مقاومت بین المان‌های مختلف برای یافتن بهترین تطابق بین نمودارهای امواج ثبت شده و محاسباتی، بایستی با در نظر گرفتن کلیه‌ی متغیرهای مؤثر و همچنین تنش‌های تحمل‌پذیر در جدار و نوک شمع صورت گیرد. لذا در صورت نبودن گزارش ژئوتکنیک برای توصیف ساخت‌گاه مورد نظر، احتمال خطا در تحلیل نتایج زیاد می‌شود، لذا بایستی از مشاهدات محلی، اطلاعات سایت‌های مجاور و حتی‌الامکان جدول‌های پیشنهاد شده‌ی منابع معتبر برای تخمین حدود متغیرهای خاک و محدوده‌ی تنش‌های تحمل‌پذیر برای خاک اطراف جدار و نوک شمع استفاده کرد. در ادامه، ابتدا به بررسی تغییر در متغیرهایی از خاک که در تعیین مشخصه‌های خاک پس از تحلیل مؤثر هستند، پرداخت و سپس تغییر در نتایج ظرفیت باربری را بیان کرد.

۱.۴. تغییر متغیرهای توصیف‌گر نوع خاک

از میان ۱۸ متغیر ورودی که شرح آن‌ها در راهنمای PDA آمده است، از تعدادی و یا همه‌ی آن‌ها برای عملیات تطابق سیگنال‌ها استفاده می‌شود، ۶ متغیر میرایی کیس برای نوک و جدار شمع، میرایی اسمیت برای نوک و جدار شمع و بیشینه‌ی تغییرمکان المان خاک برای نوک و جدار شمع به دلیل استفاده در تعیین نوع خاک، اهمیت بیشتری دارند، شکل‌های ۴ و ۵ تأثیر میرایی کیس و اسمیت را نشان می‌دهند. میرایی کیس و اسمیت با رابطه‌های ۵، ۶ و ۷ تعریف می‌شوند:

$$J_{si} = J_v / R_{si} \quad (5)$$

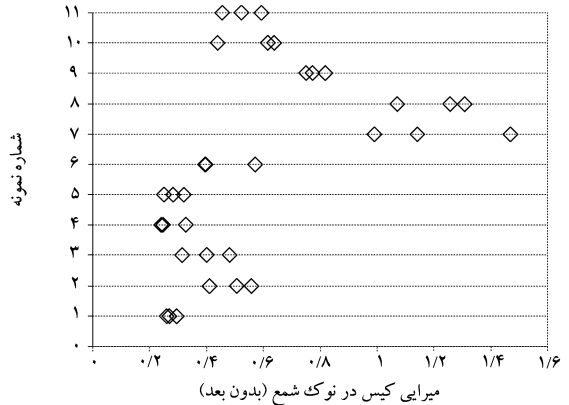
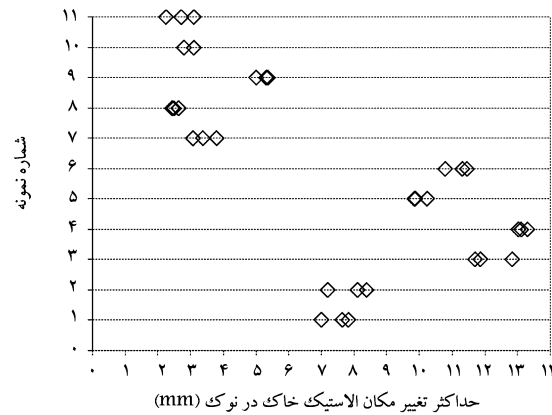
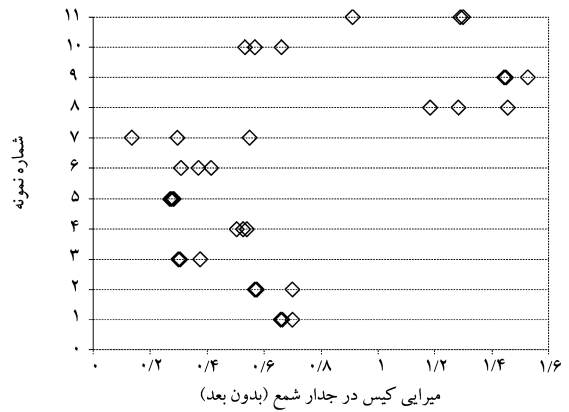
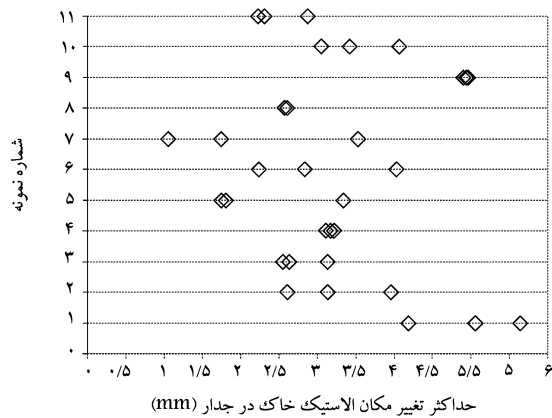
$$J_{c,skin} = \sum J_v / Z \quad (6)$$

$$J_{c,toe} = J_v / Z \quad (7)$$

در معادلات فوق، J_{si} میرایی اسمیت المان i ام، J_v میرایی ویسکوز، R_{si} مقاومت استاتیکی المان i ام، $J_{c,skin}$ و $J_{c,toe}$ به ترتیب میرایی کیس در جدار و نوک شمع و Z امپدانس شمع هستند.

طول (x) هر نقطه در شکل‌های ۴ و ۵ بیان‌گر میرایی و در شکل ۶ بیان‌گر بیشینه‌ی تغییرمکان کشسان خاک است. عرض (y) نقاط در هر سه شکل ۴، ۵ و ۶ نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی نمونه است. در حالت کلی برای هر نمونه سه مقدار متفاوت وجود دارد. البته گاهی مساوی بودن و یا نزدیک بودن مقادیر موجب شده است که سه نقطه در یک نمودار و برای یک نمونه، دو نقطه دیده شود. این تذکر لازم است که فاصله‌گرفتن نقاط مربوط به یک شماره در این منحنی نشان‌دهنده‌ی نتیجه‌ی خاصی نیست، زیرا به صورت عمد تغییر داده شده‌اند تا اثر آنها در ظرفیت باربری (جدول ۲) دیده و نتیجه‌گیری شود.

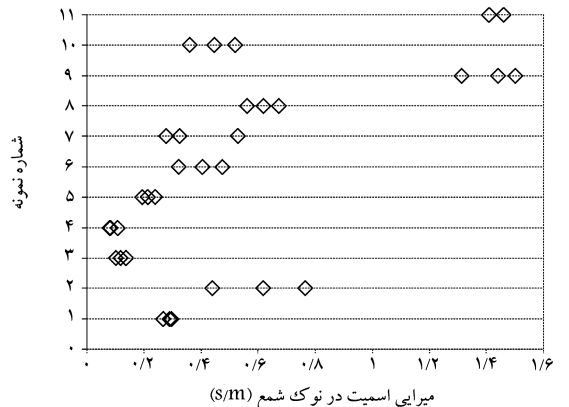
همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج بالا نشان می‌دهند که با شاخص تطابق یکسان، مقادیر متفاوتی برای میرایی کیس و اسمیت در جدار و نوک شمع به دست می‌آیند. با در نظر گرفتن کوچک بودن دامنه‌ی کلی تغییرات برای این مقادیر، در بعضی موارد مانند نمونه‌های ۶، ۷ و ۱۱ تفاوت‌های محسوسی ایجاد شده است.



شکل ۶. نمودارهای میزان تغییر در متغیرهای بیشینه‌ی تغییر مکان کشسان خاک در جدار و نوک شمع.

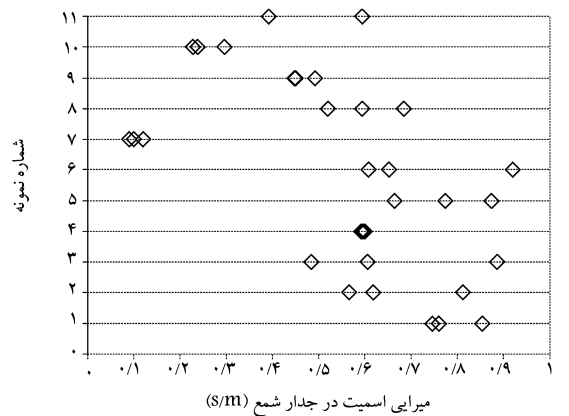
شکل ۴. نمودارهای میزان تغییر در متغیرهای میرایی کیس در جدار و نوک شمع.

بیشینه‌ی تغییر مکان کشسان خاک در جدار و نوک نیز در بعضی موارد می‌توانند تغییر محسوسی در تحلیل‌های مختلف و با شاخص تطابق مشابه، نسبت به هم داشته باشند (شکل ۶). مثلاً در نمونه‌ی ۱ برای جدار، این مقدار از ۴/۳ تا ۵/۷ میلی‌متر، یعنی از محدوده‌ی انتهای شمع‌هایی با جابجایی کوچک (Low Displacement) به محدوده‌ی ابتدای شمع‌هایی با جابجایی بزرگ (Large Displacement) که مرز بین آن‌ها حدود ۵mm است، تغییر داشته است. لذا در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که در نبود مشخصه‌های ژئوتکنیک خاک منطقه، شناخت مشخصه‌های مکانیکی خاک و قضاوت در مورد نوع خاک با به دست آوردن این مقادیر، اعتبار لازم را نخواهد داشت.



۲.۴. تغییر ظرفیت باربری با ازای تحلیل‌های مختلف

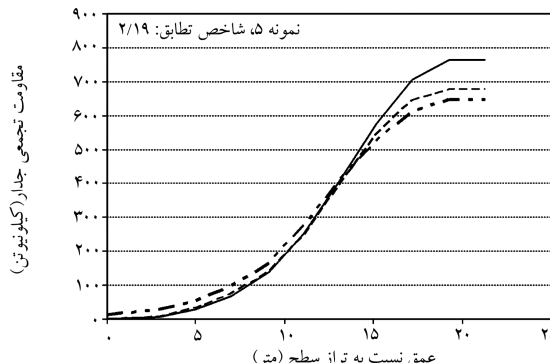
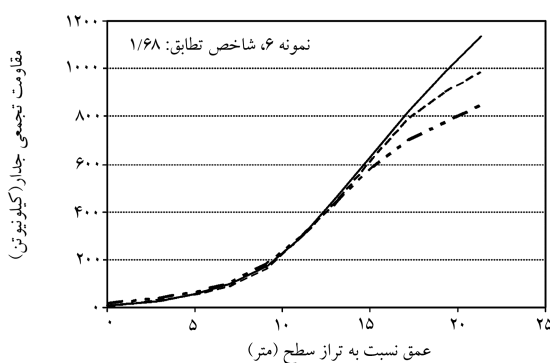
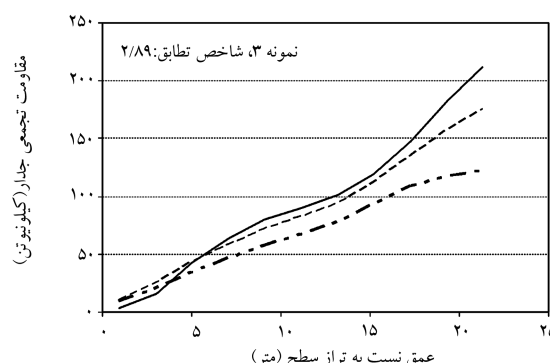
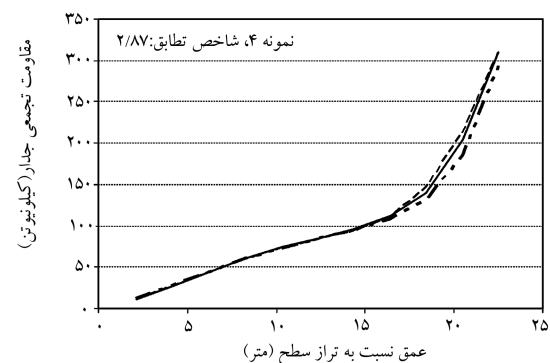
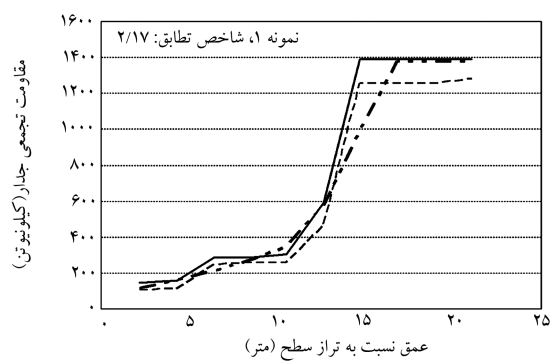
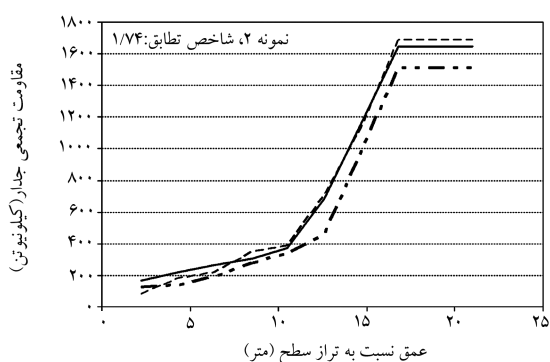
بحث قسمت بعدی در ارتباط با دقت مهم‌ترین نتایج حاصل از تحلیل، یعنی توزیع ظرفیت باربری در جدار، بین جدار و نوک و در نهایت ظرفیت باربری نهایی شمع خواهد بود. در ابتدا این توضیح لازم است که با توجه به بررسی‌های انجام شده از معادله‌های استفاده شده در این روش، از متغیرهای مقاومت برشی خاک مستقیماً برای تعیین ظرفیت باربری استفاده نشده و از متغیرهای دینامیکی خاک استفاده شده است. در ادامه نمودارهای مقاومت تجمعی جدار شمع در عمق به ازاء سه تحلیل مختلف و با شاخص تطابق یکسان مطابق شکل‌های ۷ و ۸، همچنین نتایج ظرفیت باربری کلی شمع (مجموع جدار و نوک) نیز براساس روند ذکر شده در جدول ۲ نشان داده شده است.



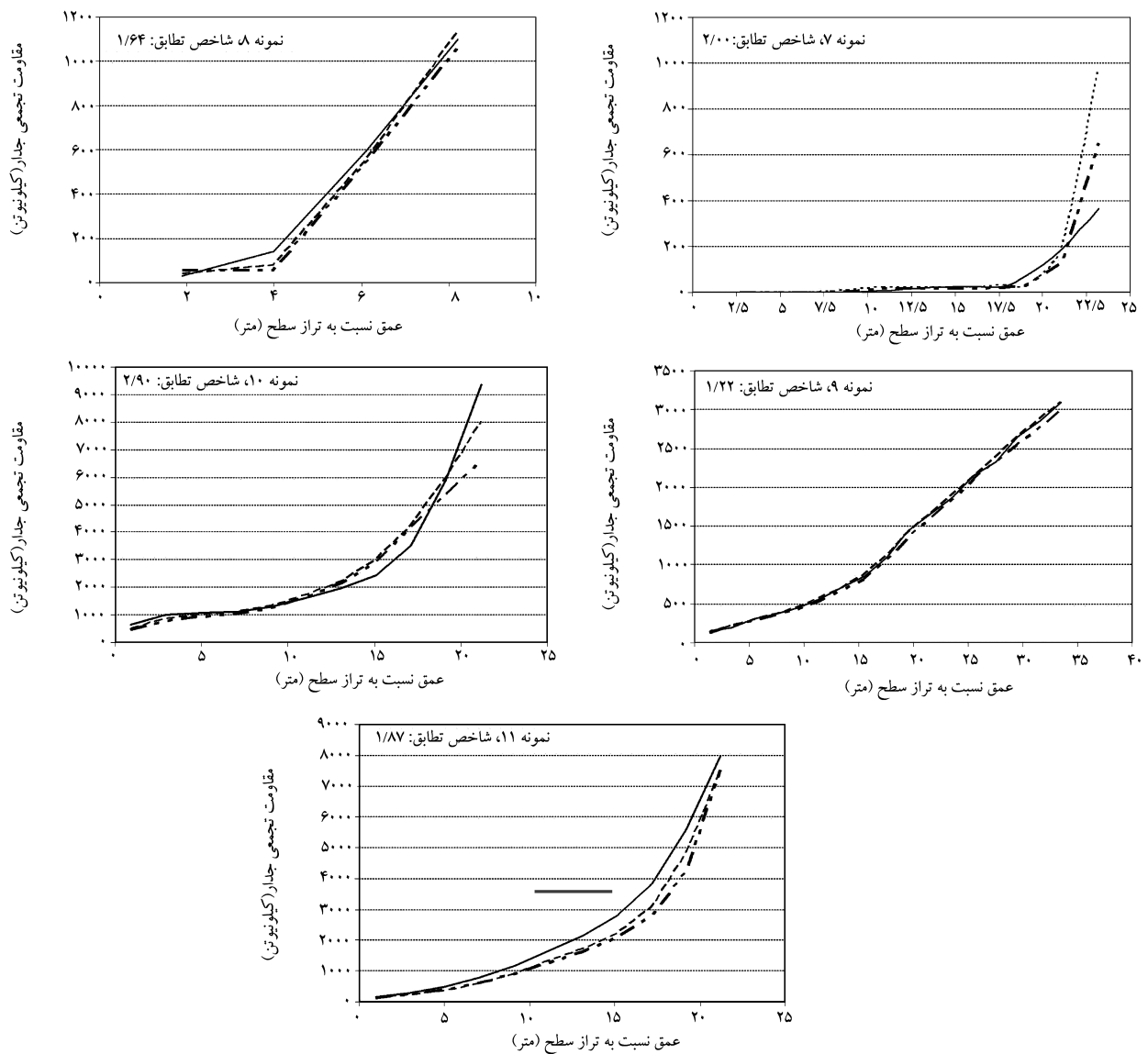
شکل ۵. نمودارهای میزان تغییر در متغیرهای میرایی اسمیت در جدار و نوک شمع.

جدول ۲. مقایسه‌ی مقادیر نهایی تحلیل CAPWAP.

نمونه	شاخص تطابق	تحلیل اول			تحلیل دوم			تحلیل سوم		
		مقاومت جدار (kN)	مقاومت نوک (kN)	مقاومت نهایی (kN)	مقاومت جدار (kN)	مقاومت نوک (kN)	مقاومت نهایی (kN)	مقاومت جدار (kN)	مقاومت نوک (kN)	مقاومت نهایی (kN)
۱	۲/۱۷	۱۲۷۸	۱۵۹۲	۲۸۷۰	۱۳۸۰	۱۴۳۵	۲۸۱۵	۱۳۸۶	۱۵۱۲	۲۸۹۸
۲	۱/۷۴	۱۶۴۸	۱۲۹۲	۲۹۴۰	۱۶۸۸	۱۱۴۸	۲۸۳۶	۱۵۱۴	۱۴۶۵	۲۹۷۹
۳	۲/۸۹	۱۷۵	۱۱۹۱	۱۳۶۶	۲۱۲	۱۱۷۹	۱۳۹۱	۱۲۳	۱۲۳۰	۱۳۵۳
۴	۲/۸۷	۳۱۰	۱۰۴۷	۱۳۵۷	۲۹۳	۱۰۵۱	۱۳۴۴	۳۱۰	۱۰۴۱	۱۳۵۱
۵	۲/۱۹	۶۷۷	۲۴۵۱	۳۱۲۸	۷۶۳	۲۴۱۱	۳۱۷۴	۶۴۸	۲۵۰۷	۳۱۵۵
۶	۱/۶۸	۹۸۵	۲۱۸۵	۳۱۷۰	۱۱۳۷	۱۸۲۱	۲۹۵۸	۸۴۳	۲۲۸۶	۳۱۲۹
۷	۲/۰۰	۶۴۷	۶۹۹	۱۳۴۶	۹۸۰	۴۶۴	۱۴۴۴	۳۶۴	۹۷۷	۱۳۴۱
۸	۱/۶۴	۱۰۹۶	۱۲۳۹	۲۳۵۵	۱۱۳۳	۱۲۰۰	۲۳۳۳	۱۰۶۵	۱۲۷۱	۲۳۳۶
۹	۱/۲۲	۲۹۸۳	۶۰۰	۳۵۸۳	۳۰۹۴	۴۸۰	۳۵۷۴	۳۰۸۹	۵۱۵	۳۶۰۴
۱۰	۲/۹۰	۶۵۷۹	۶۱۰۶	۱۲۶۸۵	۸۰۱۲	۴۷۴۶	۱۲۷۵۸	۹۳۶۷	۳۴۰۷	۱۲۷۷۴
۱۱	۱/۸۷	۷۴۹۳	۱۴۸۸	۸۹۸۱	۷۴۷۶	۱۲۲۵	۸۷۰۱	۷۹۵۱	۱۰۳۸	۸۹۸۹



شکل ۷. نمودار میزان تغییر در مقاومت تجمعی جدار برای نمونه‌های ۱ تا ۶ (خطوط پیوسته و خط چین در هر شکل نشان‌دهنده‌ی سه تحلیل مختلف با متغیرهای ورودی مختلف برای یک نمونه هستند).



شکل ۸. نمودار میزان تغییر در مقاومت تجمعی جدار برای نمونه‌های ۷ تا ۱۱ خطوط پیوسته و خط چین در هر شکل نشان‌دهنده‌ی سه تحلیل مختلف با متغیرهای ورودی مختلف برای یک نمونه هستند.

جدار و نوک) به منزله‌ی کمیت قابل اعتماد حاصل از این روش توجه شده است. در انتها و براساس جدول ۲، با توجه به مقادیر به دست آمده برای کلیه‌ی نمونه‌ها، این نتیجه را می‌توان گرفت که مقدار ظرفیت باربری نهایی (مجموع ظرفیت باربری جدار و نوک شمع) که اصلی‌ترین خروجی آزمایش PDA است به ازاء تحلیل‌های مختلف با متغیرهای ورودی متفاوت و با در نظر گرفتن شاخص تطابق یکسان، تغییر چندانی نداشته است و در یک محدوده‌ی کوچک ثابت می‌ماند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، توزیع مقاومت در المان‌های جدار نیز می‌تواند متناسب با تغییر متغیرهای اصلی خاک، در یک محدوده‌ی کم (نمونه‌های ۴، ۸ و ۹)، متوسط (نمونه‌های ۱ الی ۶) و یا نسبتاً زیاد (نمونه‌های ۷ و ۱۱) تغییر کند. البته در نمونه‌های ۷ و ۱۱ به دلیل اینکه بیشینه‌ی تغییر مکان المان نوک و المان جدار مقادیر نزدیک به هم دارند، آخرین المان جدار و المان سرشمع هم‌زمان فعال می‌شوند، لذا دقیقاً نمی‌توان مشخص کرد که توزیع مقاومت بین این دو المان چگونه صورت می‌گیرد.

در حقیقت برای دو نمونه‌ی ۷ و ۱۱، تفاوت مشهودی که بین مقاومت جدار و نوک شمع دیده می‌شود، فقط تفاوت در توزیع مقاومت بین المان آخر جدار و نوک شمع است و سایر مشخصات بقیه‌ی المان‌های جدار در یک محدوده‌ی کوچک تغییر کرده‌اند.

با توجه به مطالب فوق، در این نوشتار با توجه به عدم اطمینان از سهم مقاومت جدار و مقاومت نوک از ظرفیت باربری کلی، فقط به مقاومت کل (مجموع مقاومت‌های

۵. تجزیه و تحلیل اطمینان‌پذیری شالوده‌های عمیق بر پایه‌ی نتایج PDA

بررسی اعتماد به نتایج آزمایش PDA در قسمت قبلی با بررسی تغییر متغیرهای خاک و مقاومت در مرحله‌ی یافتن شاخص تطابق مناسب صورت گرفت و معلوم

جدول ۳. نتایج آماری بارهای مرده و زنده در طراحی پل‌ها.

بار مرده	میانگین (μ_λ)	ضریب تغییرات (COV_λ)
- ناشی از آلمان پیش ساخته	۱/۰۳	۰/۰۸
- ناشی از آلمان ساخته شده در محل کارگاه	۱/۰۵	۰/۱۰
- آسفالت پوششی سطح	۱/۰۰	۰/۲۵
زنده	۱/۱۰	۰/۱۸

به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_{QD} = 1/03 \times 1/05 = 1/08$$

$$COV_{QD} = \left[(0/08)^2 + (0/10)^2 \right]^{1/2} = 0/13$$

بار مرده: QD

توزیع ضرایب λ برای هر دو بار زنده و مرده با این فرض که تمام این مقادیر مثبت هستند به صورت لوگ نرمال در نظر گرفته شده است.

۲.۵. آمار مقاومت

در این بخش ابتدا نیاز به داشتن دو سری اطلاعات است: الف) اطلاعات مربوط به ظرفیت باربری نهایی شمع با استفاده از تجزیه و تحلیل استاتیکی، ب) اطلاعات مربوط به ظرفیت باربری دینامیکی با استفاده از PDA. برای قسمت الف) با توجه به در دسترس بودن اطلاعات محدودی از مشخصات ژئوتکنیک شمع‌های مورد تحقیق، سعی بر آن شده است که از روشی استفاده شود که بیشترین تطابق را با اطلاعات ژئوتکنیک موجود از نمونه‌های تحقیق داشته باشد، لذا با در نظر داشتن این مطلب از رابطه‌های ظرفیت باربری جانبی و API برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری استاتیکی شمع‌ها استفاده شده است. برای قسمت ب) نیز از نتایج موجود ظرفیت باربری با استفاده از PDA استفاده شده است.

آمار مقاومت در این مطالعه براساس ضرایب λ_R تعریف شده است. این ضریب از نسبت بار واقعی تحمل‌پذیر به وسیله‌ی شمع (براساس نتایج آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی برج) به ظرفیت باربری به دست آمده از طراحی شمع با استفاده از رابطه‌های تجربی تعیین ظرفیت باربری به دست می‌آید. این مقادیر برای ۱۱ نمونه‌ی مورد تحقیق در جدول ۴ نشان داده شده است.

در جدول ۴ مقادیر ضرایب تغییرات مقاومت، COV_R ، با محاسبه‌ی میانگین و انحراف معیار ضرایب λ_R (به ترتیب $\mu_R(\lambda_{R,mean})$ ، $\sigma_R(STDev)$) با استفاده از رابطه‌ی ۹ به دست آمده است:

$$COV_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \quad (9)$$

همان‌طور که در بالا نیز گفته شد، λ نسبت بار واقعی تحمل‌پذیر شمع به بار طراحی آن است. این ضریب در حقیقت تمام عدم قطعیت‌های ناشی از منابع خطا مانند خطا در انجام آزمایش PDA و تحلیل CAPWAP، خطا در تعیین متغیرهای مکانیکی خاک و خطا در انتخاب نوع رابطه‌های مورد استفاده در محاسبه‌ی ظرفیت باربری استاتیکی شمع را در بر می‌گیرد. در جدول ۴ با توجه به مقادیر به دست آمده برای خطای نسبی λ ، نسبت به مقدار میانگین آن در هر نمونه کمتر از ۵٪ است. با توجه به خطاهای بالای موجود در تعیین ظرفیت باربری برجی شمع با استفاده

شد که چگونه نتایج این آزمون به ازاء تحلیل‌های مختلف و با داشتن شاخص تطابق یکسان می‌توانند تغییر نکنند. در این قسمت تجزیه و تحلیل اطمینان‌پذیری که در زمینه‌های مختلف در مهندسی ژئوتکنیک استفاده می‌شود،^[۱۰] برای یک شالوده‌ی عمیق در چارچوب ریاضی متداول انجام می‌شود که در آن از نتایج PDA استفاده شده است.

اولین قدم در ارزیابی اطمینان‌پذیری یا احتمال گسیختگی یک شالوده‌ی عمیق، تصمیم‌گیری در مورد حدود اطمینان مورد نیاز پروژه است. این کار با بیان تابع حالت حدی مرتبط و متغیرهای بار (Q) و مقاومت (R) انجام می‌شود. تابع حالت حدی را می‌توان به صورت یک تابع ریاضی مثل $g(R, Q) = 0$ تعریف کرد که g می‌تواند تابعی خطی و یا غیرخطی از R و Q باشد. گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که $g(R, Q)$ کوچک‌تر از صفر باشد. بنابراین تابع احتمال گسیختگی (P_f) به صورت انتگرال رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود:

$$P_f = \int \int_{g < 0} f_{R,Q}(r, q) dr dq \quad (8)$$

که در آن $f_{R,Q}(r, q)$ تابع چگالی احتمال مشترک برای متغیرهای پایه‌ی R و Q است و انتگرال‌گیری روی ناحیه‌ی گسیختگی ($g < 0$) صورت می‌گیرد. معادله‌ی ۸ در حکم معادله‌ی پایه‌ی تحلیل‌های اطمینان‌پذیری به شمار می‌رود. به طور کلی یافتن تابع چگالی احتمال مشترک متغیرهای تصادفی مشکل است و تابع چگالی احتمال مستقل متغیرهای تصادفی PDF،^۵ نیز همیشه به صورت صریح قابل دسترسی نخواهد بود. لذا تقریب‌های تحلیلی از این انتگرال به کار گرفته شده تا با استفاده از آن بتوان اطمینان‌پذیری یا احتمال گسیختگی را محاسبه کرد. در این تحقیق از یکی از روش‌های تقریب‌زنی اطمینان‌پذیری درجه‌ی یک (FORM) با عنوان MVFOSM^۶ استفاده شده است.

۱.۵. آمار بارگذاری

آمار بارگذاری واقعی سازه‌ها در طول عمر بهره‌برداری آنها معمولاً وجود ندارد. در این تحقیق نیز با توجه به دسترسی نداشتن به اطلاعات آماری بارگذاری شمع‌های مورد تحقیق و ضرایب بار آیین‌نامه‌ی طراحی به روش ضرایب مقاومت و بار (LRFD)^۷ و آیین‌نامه‌ی (AASHTO)^۸ استفاده شده است. این آمار را که در جدول ۳ نشان داده شده است، نوک (Nowak) در سال ۱۹۹۲ به دست آورد.^[۱۰] همچنین در مطالعه‌ی اطمینان‌پذیری ترکیب بارهای مرده و زنده (ثقلی) مد نظر قرار گرفته است. زیرا معمولاً این ترکیب بار در طراحی پل‌ها به منزله‌ی ترکیب بار حاکم است و لذا در حکم محافظه‌کارانه‌ترین حالت برای ارزیابی شاخص اطمینان‌پذیری و احتمال گسیختگی در نظر گرفته می‌شود. ضرایب باری که در اینجا استفاده شده‌اند به ترتیب برابر با ۱/۲۵ برای بار مرده و ۱/۶۵ برای بار زنده است. آمار بارگذاری که در تحلیل اطمینان‌پذیری استفاده می‌شود شامل متغیرهای میانگین (μ)، ضریب تغییرات (COV)^۹، انحراف معیار (STDev)^{۱۰} و ضرایب نسبت بار واقعی اعمال شده به شمع به بار طراحی شمع (λ) تعریف می‌شوند. با توجه به جدول ۳، بیشترین تغییرات در وزن آسفالت پوششی سطح روی عرشه‌ی پل دیده می‌شود.

البته با توجه به اینکه درصد بسیار کوچکی از کل بارهای مرده‌ی سازه به وزن آسفالت پوششی سطح اختصاص دارد، می‌توان در محاسبه‌ی میانگین (μ)، ضرایب تغییرات (COV) و λ برای بارهای مرده، از آن صرف‌نظر کرد. بنابراین با حذف بار مرده‌ی ناشی از آسفالت سطح مقادیر μ ، COV و λ برای بارهای مرده

جدول ۴. محاسبه‌ی ضرایب تحلیل اطمینان‌پذیری نمونه‌های مورد تحقیق.

متغیرهای آماری λ_R	خطای λ_R به‌ازای هر تحلیل نسبت به میانگین نمونه‌ها (درصد)	λ_R	ظرفیت باربری استاتیکی $Janbu_{toe} + API_{skin}$ (kN)	نتایج CAPWAP (kN)	نمونه
$\lambda_{R,mean} = 0.958$ $STDev(\lambda_R) = 0.2074$	0.31	0.95	30.16	2870	1-1
	1.61	0.93	30.16	2815	1-2
	1.29	0.96	30.16	2898	1-3
$COV_R = 0.216$	0.74	0.97	30.16	2940	2-1
	2.82	0.94	30.16	2836	2-2
	2.08	0.99	30.16	2979	2-3
$\lambda_{R,mean} = 0.769$ $STDev(\lambda_R) = 0.094$ $COV_R = 0.216$	0.29	0.77	1769	1366	3-1
	1.53	0.79	1769	1391	3-2
	1.24	0.76	1769	1353	3-3
	0.47	0.77	1769	1357	4-1
	0.49	0.76	1769	1344	4-2
	0.02	0.76	1769	1351	4-3
$\lambda_{R,mean} = 0.7208$ $STDev(\lambda_R) = 0.188$ $COV_R = 0.260$	0.77	0.72	4327	3128	5-1
	0.69	0.73	4327	3174	5-2
	0.08	0.73	4327	3155	5-3
	2.73	0.73	4327	3170	6-1
	4.14	0.68	4327	2958	6-2
	1.40	0.72	4327	3129	6-3
$\lambda_{R,mean} = 1.0573$ $STDev(\lambda_R) = 0.446$ $COV_R = 0.422$	2.25	1.03	1302	1346	7-1
	4.87	1.11	1302	1444	7-2
	2.61	1.03	1302	1341	7-3
$\lambda_{R,mean} = 3.4965$ $STDev(\lambda_R) = 0.178$ $COV_R = 0.051$	0.58	3.52	670	2355	8-1
	0.36	3.48	670	2323	8-2
	0.23	3.49	670	2336	8-3
$\lambda_{R,mean} = 0.4745$ $STDev(\lambda_R) = 0.020$ $COV_R = 0.043$	0.11	0.47	7559	3583	9-1
	0.36	0.47	7559	3574	9-2
	0.47	0.48	7559	3604	9-3
$\lambda_{R,mean} = 0.4899$ $STDev(\lambda_R) = 0.906$ $COV_R = 0.1952$	0.42	0.57	22077	12685	10-1
	0.15	0.58	22077	12758	10-2
	0.27	0.58	22077	12774	10-3
	1.02	0.41	22077	8981	11-1
	2.13	0.39	22077	8701	11-2
	1.11	0.41	22077	8989	11-3

اطمینان‌پذیری یا احتمال گسیختگی را محاسبه کرد. در این مطالعه از یکی از روش‌های تقریب‌زنی FORM یا همان اطمینان‌پذیری درجه‌ی یک برای یافتن جواب انتگرال معادله‌ی ۸ با عنوان تحلیل مقدار میانگین درجه‌ی اول، لنگر دوم (MVFOSM) استفاده شده است. در تحلیل MVFOSM از تقریب درجه‌ی اول سری تیلور برای بسط تابع حالت حدی $(g(R, Q))$ استفاده می‌شود و این تابع با استفاده از مقادیر میانگین متغیرهای تصادفی به یک تابع خطی تبدیل می‌شود. همچنین در محاسبه‌ی شاخص اطمینان‌پذیری نیز فقط از آماره‌های لنگر دوم (میانگین و انحراف معیار) متغیرهای تصادفی استفاده می‌کند. در این مطالعه دو متغیر تصادفی اساسی بار (Q) و مقاومت (R) در نظر گرفته شده است که برای هر دوی آنها از توزیع آماری

از روش‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آزمون PDA در این بررسی اطمینان‌پذیری لازم را دارد.

۳.۵. بررسی اطمینان‌پذیری با استفاده از تحلیل درجه‌ی اول، لنگر دوم (FORM)

همان‌طور که در ابتدای این بخش گفته شد، حل صریح معادله‌ی ۸ به‌مشزله‌ی معادله‌ی پایه‌ی تحلیل‌های اطمینان‌پذیری معمولاً ممکن نیست. لذا برای محاسبه‌ی انتگرال معادله‌ی ۸ تقریب‌های تحلیلی به‌کارگرفته می‌شوند تا بتوان با استفاده از آن

در رابطه‌های ۲۰ و ۲۱، QD بار مرده و QL بار زنده هستند که به صورت متغیرهای تصادفی مستقل فرض می‌شوند، لذا خواهیم داشت:

$$COV_Q^* = COV_{QD}^* + COV_{QL}^* \quad (22)$$

در انتها، پس از ساده‌سازی می‌توان رابطه‌ی ۱۴ را به صورت معادله‌ی ۲۳ بازنویسی کرد:

$$\beta = \frac{\ln \left[\frac{\lambda_{RF} FS \left(\frac{QD}{QL} + 1 \right)}{\lambda_{QD} \frac{QD}{QL} + \lambda_{QL}} \sqrt{\frac{1 + COV_{QD}^* + COV_{QL}^*}{1 + COV_R^*}} \right]}{\sqrt{\ln \left[(1 + COV_R^*) (1 + COV_{QD}^* + COV_{QL}^*) \right]}} \quad (23)$$

رابطه‌ی ۲۳ شاخص اطمینان‌پذیری طرح شالوده‌ی عمیق با استفاده از فرمول‌های استاتیکی را نشان می‌دهد. این شاخص که بیان‌گر احتمال گسیختگی طرح شمع با استفاده از تجزیه و تحلیل استاتیکی است، براساس مقایسه‌ی نتایج طرح با آمار دقیق ظرفیت باربری واقعی شمع حاصل از نتایج آزمون PDA به دست آمده است. از رابطه‌ی ۲۳ چنین برمی‌آید که شاخص اطمینان‌پذیری تابعی از ضریب اطمینان طراحی (FS)، نسبت بار مرده به زنده (QD/QL)، آمار بار (λ_{QL})، λ_{QD} ، COV_{QD} و COV_{QL} و آمار مقاومت (λ_R)، COV_R است. در این مطالعه نسبت‌های مختلف QD/QL برابر با ۰٫۵، ۱٫۰، ۲٫۰ و ۳٫۰ و همچنین ضرایب اطمینان ۲ و ۲٫۵ و ۳ در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص اطمینان‌پذیری β در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول از مقادیر ذکر شده در جدول ۳ به منزله‌ی متغیرهای بارگذاری استفاده شده است.

همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، شاخص اطمینان‌پذیری (β) به نسبت‌های متفاوت بارگذاری حساس نبوده و تغییر بسیار کمی از خود نشان می‌دهد. اما میزان این تغییر براساس ضریب اطمینان (FS) محسوس است.

همچنین ملاحظه می‌شود که بعضی از مقادیر β نیز در جدول ۵ منفی هستند. با توجه به اینکه در این تحقیق هر دو متغیر بار و مقاومت با استفاده از توزیع لوگ-نرمال بسط یافته‌اند و شاخص اطمینان‌پذیری نیز براساس یک رابطه‌ی لگاریتمی تعریف شده است، وقتی که ضریب میانگین λ_R خیلی کوچک باشد، عبارت داخل کروشه در صورت کسر معادله‌ی ۲۷ می‌تواند مقادیر کمتر از یک نیز به خود بگیرد که با لگاریتم‌گیری از آن شاخص β منفی خواهد شد. شاخص اطمینان‌پذیری به لحاظ تئوریک می‌تواند مقادیر منفی نیز به خود بگیرد و چنین مقداری بدان معنی است که حتی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان (FS) ۳ در طرح، روش به‌کارگرفته شده در طرح شالوده مناسب نبوده و سازگاری لازم با شرایط ژئوتکنیک منطقه‌ی مورد نظر را ندارد.

اعداد منفی و اعداد نزدیک به صفر در حقیقت نشان‌گر شاخص اطمینان‌پذیری بسیار پایین طرح و احتمال گسیختگی بالای ۵۰٪ است. در عین حال، در محدوده‌ی کارهای مهندسی شاخص اطمینان‌پذیری ۲ (معادل احتمال گسیختگی ۱۰٪ در مقایسه‌ی نتایج طرح استاتیکی نسبت به بار واقعی تحمل‌پذیر به وسیله‌ی شمع) تقریباً به منزله‌ی شاخص مناسب در طرح به شمار می‌رود. لذا اعداد در حدود ۲ و بزرگ‌تر از آن نشان‌گر اطمینان‌پذیری روش به کارگرفته شده در طرح استاتیکی شالوده‌ی عمیق است.

با توجه به توضیح ذکر شده، این مطلب را می‌توان درک کرد که شاخص اطمینان‌پذیری در حقیقت تفسیری از احتمال گسیختگی طرح برای ظرفیت باربری

لوگ نرمال استفاده می‌شود. لذا در این حالت تابع حالت حدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g(R, Q) = \ln\left(\frac{R}{Q}\right) = \ln(R) - \ln(Q) \quad (10)$$

فرض می‌شود که متغیرهای تصادفی R ، Q مستقل از یکدیگر هستند و توزیع حاکم بر متغیرها لوگ نرمال است. لذا $\ln(R)$ و $\ln(Q)$ توزیع نرمال خواهند داشت. پس در نهایت میانگین تابع چگالی احتمال ($\bar{g}(R, Q)$) به صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:

$$\bar{g} = \overline{\ln(R)} - \overline{\ln(Q)} \quad (11)$$

در رابطه‌ی ۱۱، طبق تعریف متغیرهای توزیع لوگ نرمال داریم:

$$\overline{\ln(R)} = \ln(\bar{R}) - \ln(1 + COV_R^*)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\overline{\ln(Q)} = \ln(\bar{Q}) - \ln(1 + COV_Q^*)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\bar{g} = \ln\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}} \sqrt{\frac{1 + COV_Q^*}{1 + COV_R^*}}\right) \quad (14)$$

انحراف معیار دو متغیر مستقل نیز در توزیع لوگ نرمال به صورت رابطه‌ی ۱۵ تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_R = \sqrt{\ln(1 + COV_R^*) (1 + COV_Q^*)} \quad (15)$$

که در آن، \bar{Q} ، \bar{R} میانگین مقادیر بار و مقاومت و COV_Q و COV_R ضرایب تغییرات Q ، R هستند.

براساس تعریف Haldal و همکاران در سال ۲۰۰۰، شاخص اطمینان‌پذیری، β ، به صورت نسبت \bar{g} به ε_g بیان می‌شود:

$$\beta = \frac{\ln \left[\frac{\bar{R}}{\bar{Q}} \sqrt{\frac{1 + COV_Q^*}{1 + COV_R^*}} \right]}{\sqrt{\ln(1 + COV_R^*) (1 + COV_Q^*)}} \quad (16)$$

مقادیر میانگین بار و مقاومت را می‌توان براساس بار و مقاومت اسمی Q_n ، R_n و ضرایب به ترتیب λ_Q و λ_R به صورت رابطه‌های ۱۷ و ۱۸ تعریف کرد:

$$\bar{Q} = \lambda_Q Q_n \quad (17)$$

$$\bar{R} = \lambda_R R_n \quad (18)$$

در نتیجه معادله‌ی ۱۶ به صورت رابطه‌ی ۱۹ خواهد شد:

$$\beta = \frac{\ln \left[\frac{\lambda_R R_n}{\lambda_Q Q_n} \sqrt{\frac{1 + COV_Q^*}{1 + COV_R^*}} \right]}{\sqrt{\ln(1 + COV_R^*) (1 + COV_Q^*)}} \quad (19)$$

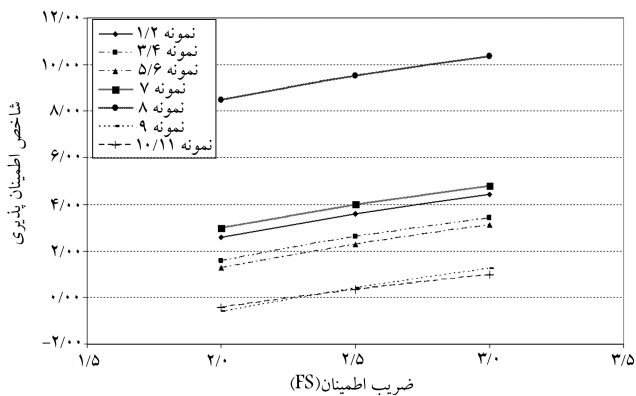
R_n و Q_n را می‌توان براساس ضریب اطمینان (FS) به صورت $FS = R_n / Q_n$ بیان کرد. با در نظر گرفتن ترکیب بارگذاری بار مرده به علاوه‌ی بار زنده‌ی آیین‌نامه‌ی AASHTO خواهیم داشت:

$$\lambda_Q Q_n = \lambda_{QD} QD + \lambda_{QL} QL \quad (20)$$

$$R_n = FS(QD + QL) \quad (21)$$

جدول ۵. محاسبه شاخص اطمینان‌پذیری برای نمونه‌های مورد تحقیق.

نمونه	نسبت بار قابل تحمل با بار طراحی (λ_R)	ضریب تغییرات (COV_R)	شاخص اطمینان‌پذیری (β)			
			$QD/QL=3/0$	$QD/QL=2/0$	$QD/QL=1/0$	$QD/QL=0/5$
۲و۱	۰٫۹۵۸	۰٫۲۱۶	۲٫۶۴	۲٫۶۱	۲٫۵۶	۲٫۵۲
			۳٫۶۵	۳٫۶۲	۳٫۵۸	۳٫۵۳
			۴٫۴۲	۴٫۴۵	۴٫۴۰	۴٫۳۶
۳و۳	۰٫۷۶۹	۰٫۱۲۳	۱٫۶۵	۱٫۶۲	۱٫۵۷	۱٫۵۳
			۲٫۶۶	۲٫۶۴	۲٫۵۹	۲٫۵۴
			۳٫۴۴	۳٫۴۹	۳٫۴۷	۳٫۴۲
۶و۵	۰٫۷۲۱	۰٫۲۶۰	۱٫۳۴	۱٫۳۲	۱٫۲۷	۱٫۲۲
			۲٫۳۵	۲٫۳۳	۲٫۲۸	۲٫۲۳
			۳٫۱۲	۳٫۱۵	۳٫۱۱	۳٫۰۶
۷	۱٫۰۵۷	۰٫۴۲۲	۳٫۰۴	۳٫۰۲	۲٫۹۷	۲٫۹۲
			۴٫۰۴	۴٫۰۱	۳٫۹۷	۳٫۹۲
			۴٫۸۰	۴٫۸۵	۴٫۷۸	۴٫۷۴
۸	۳٫۴۹۶	۰٫۰۰۵۱	۸٫۵۵	۸٫۵۲	۸٫۴۸	۸٫۴۳
			۹٫۵۱	۹٫۵۴	۹٫۴۹	۹٫۴۵
			۱۰٫۳۴	۱۰٫۳۷	۱۰٫۳۲	۱۰٫۲۸
۹	۰٫۴۷۵	۰٫۰۰۴۳	-۰٫۵۵	-۰٫۵۸	-۰٫۶۲	-۰٫۶۷
			۰٫۴۱	۰٫۴۴	۰٫۳۹	۰٫۳۴
			۱٫۲۴	۱٫۲۷	۱٫۲۲	۱٫۱۸
۱۱و۱۰	۰٫۴۹۰	۰٫۱۹۵۲	-۰٫۳۷	-۰٫۳۹	-۰٫۴۲	-۰٫۴۶
			۰٫۳۵	۰٫۳۸	۰٫۳۴	۰٫۳۰
			۰٫۹۸	۱٫۰۰	۰٫۹۶	۰٫۹۳



شکل ۹. نمودار شاخص اطمینان‌پذیری براساس ضریب اطمینان.

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار برای بررسی دقت نتایج ظرفیت باربری شمع حاصل از اندازه‌گیری‌های دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار CAPWAP، مطالعه‌ی روی ۱۱ نمونه از آزمون‌های PDA بر شمع‌های مختلف، انجام شده است. نتایج به‌دست آمده را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

الف) از میان ۱۸ متغیر ورودی مهم که معمولاً برای رسیدن به شاخص تطابق مناسب، در نظر گرفته می‌شوند، ۶ متغیر میرایی کیس برای نوک و جدار شمع،

به‌دست آمده از طرح استاتیکی با مقایسه‌ی آن با نتایج آزمون‌های برجا برای شمع‌های پروژه‌ی مورد نظر است.

رابطه‌ی استاندارد نیز وجود دارد که براساس آن می‌توان احتمال گسیختگی معادل یک شاخص اطمینان‌پذیری معین را برای مقادیر تصادفی با توزیع لوگ نرمال تخمین زد. این رابطه که امروزه در اغلب منابع^[۱۰] برای موارد مشابه استفاده می‌شود به‌صورت رابطه‌ی ۲۸ است:

$$P_f = -\Phi^{-1}(\beta) \quad (24)$$

در رابطه‌ی ۲۸، β شاخص اطمینان‌پذیری، P_f احتمال گسیختگی معادل آن و Φ تابع تبدیل β هستند. مقادیر P_f را می‌توان براساس جدول‌های استاندارد که براساس رابطه‌ی ۲۸ و برای توزیع لوگ نرمال تهیه شده است استخراج کرد. برای مقادیر β بین ۲ و ۶ می‌توان از رابطه‌ی ۲۹ استفاده کرد:^[۱۰]

$$P_f = 460 e^{(-2.2\beta)} \quad (25)$$

که در آن، e عدد نپر است. با توجه به این رابطه، هرچه β بزرگ‌تر باشد احتمال گسیختگی طرح کاهش می‌یابد و بالعکس.

در شکل ۹ مقادیر شاخص اطمینان‌پذیری براساس ضریب اطمینان FS نیز نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش ضریب اطمینان، احتمال گسیختگی طرح کاهش یافته است.

مقاومت، در بیشتر موارد به حدود ۲٪ و در بدترین حالت به ۵٪ می‌رسد. با توجه به خطای بالایی که در تعیین ظرفیت باربری استاتیکی شمع‌ها با استفاده از فرمول‌های تجربی استاتیکی وجود دارد می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مورد استفاده از PDA در تحلیل ظرفیت باربری و مطالعه‌ی اطمینان‌پذیری به طور نسبی دارای دقت کافی و خطای ایجاد شده قابل صرف نظر است؛

ز) با استفاده از مطالعه‌ی اطمینان‌پذیری انجام شده، می‌توان میزان دقت در روش انتخاب شده برای طرح استاتیکی شالوده‌ی عمیق را برای منطقه‌ی مورد نظر بررسی کرد. برای مثال، مقادیر منفی و نزدیک به صفر در محاسبه‌ی شاخص اطمینان‌پذیری، نشان‌دهنده‌ی تطابق‌نداشتن روش طرح استاتیکی انتخاب شده با شرایط ژئوتکنیک منطقه و احتمال گسیختگی بیش از ۵٪ است و مقدار کمینه‌ی ۲ به معنی اطمینان‌پذیر بودن طرح شالوده‌ی مورد نظر در محدوده‌ی کارهای مهندسی است؛

ح) در نتیجه‌گیری عمومی بیان می‌شود که نتایج آزمون دینامیکی شمع با استفاده از PDA برای تعیین ظرفیت باربری کلی شمع اطمینان‌بخش است، اما برای تخمین سایر متغیرها مانند متغیرهای مربوط به رفتار خاک و توزیع ظرفیت باربری بین جدار و نوک، دقت کافی ندارد.

تقدیر و تشکر

در پایان از مدیر بخش ژئوتکنیک شرکت مهندسان مشاور ساحل و کارشناسان این شرکت، به دلیل در اختیار قراردادن امکانات لازم برای انجام دادن آزمون و فراهم کردن نرم‌افزار تحلیل، تشکر و قدردانی می‌شود.

پانویس

1. pile driving analyzer(PDA)
2. case pile wave analysis program(CPWAP)
3. match quality number(MQ)
4. first order reliability method(FORM)
5. probability density function(PDF)
6. mean value first order second moment(MVFOSM)
7. load & resistance factor design(LRFD)
8. American Association of State Highways & Transportation Organization (AASHTO)
9. coefficient of variation(COV)
10. standard deviation
11. factor of safety

منابع

1. Garland; Rausche, F.; Thendean, G., and Svinikin, M., "CAPWAP correlation studies", *STRESSWAVE '96 Conference: Orlando, FL*; pp.447-464 (1996).
2. Rausche, F.; Robinson, B., and Liang, L., "Automatic signal matching with CAPWAP", *Sixth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles: São Paulo, Brazil*; pp.53-58 (2000).
3. Zhang, L.; McVay, M. C., and Charls, W. W. Ng., "A possible physical meaning of case damping in pile dynamics", *Canadian. Geotech. J.*, **38**(1), pp.83-94 (2001).

میرایی اسمیت برای نوک و جدار شمع و پیشینه‌ی تغییرمکان المان خاک برای نوک و جدار شمع، چون در تعیین مشخصات خاک به کار می‌روند، دارای اهمیت بیشتری هستند؛

ب) با در نظر گرفتن شاخص تطابق یکسان، می‌توان مقادیر متفاوتی برای میرایی کیس یا اسمیت به دست آورد که چنین نتیجه‌ی برای پیشینه‌ی تغییر مکان الاستیک خاک نیز صادق است؛

ج) با توجه به مورد اخیر می‌توان نتیجه گرفت که در نبود مشخصات ژئوتکنیک خاک منطقه، شناخت مشخصات مکانیکی خاک و قضاوت در مورد نوع خاک با به دست آوردن این مقادیر، اعتبار لازم را نخواهد داشت؛

د) با ثابت بودن شاخص تطابق، تغییرات توزیع مقاومت در المان‌های جدار نزدیک به نوک و المان نوک شمع در شرایطی که پیشینه‌ی تغییرمکان المان خاکی زیر نوک شمع و المان خاکی جدار نزدیک به هم باشند، زیاد است. لذا در این موارد حتی به ازای شاخص تطابق یکسان می‌توان به نسبت‌های مقاومت نوک و جدار دست یافت؛

ه) مقدار ظرفیت باربری نهایی (مجموع باربری جدار و نوک شمع) به ازاء تحلیل‌های مختلف و با در نظر گرفتن شاخص تطابق یکسان، تغییر چندانی نداشته و در یک محدوده‌ی کوچک ثابت می‌ماند؛

و) در مطالعه‌ی اطمینان‌پذیری برای محاسبه‌ی نسبت بار واقعی تحمل‌پذیر به ظرفیت باربری به دست آمده از طراحی شمع (λ)، تأثیر تفاوت در نتایج CAPWAP به ازاء تحلیل‌های متفاوت ظرفیت باربری روی یک شمع نسبت به میانگین

4. Seyedi Hoseini-nia, E., "Study of number of pile dynamic testing results by use of PDA and describing the lessons learnt", 7th International Conference on Coasts, Ports and Marine structures, ICOPMAS, *Proceeding CD*, Code 278 (2006).
5. Keyhanian, A., "Study of accuracy of PDA based on the static and dynamic pile testing results in bandar abbas dry dock and bandar abbas 150000 ton jetty", 7th International Conference on Coasts, Ports and Marine structures, ICOPMAS, *Proceeding CD*, Code 211 (2006).
6. Seyedi Hoseini-nia, E., "Assessment of a correlation for determination of pile's in-situ bearing capacity based on the site measurements", 7th International Conference on Coasts, Ports and Marine structures, ICOPMAS, *Proceeding CD*, Code 334 (2006).
7. Goble, G.G., "Case-Goble method, derivations & theory guide", *PDA manual of operation*, appendix A, Pile dynamics Inc.
8. Rausche, F.; Likins, G.E., and Goble, G.G., "Design and construction of driven pile foundation", *Publication No. FHWA HI 97-014*, Revised November, National Highway, **2** (1998).
9. Rojhani, M., and Fakher, A., "Evaluation of the Hiley's formula in determination of pile's In-Situ bearing capacity", *2nd Civil Engineering Congress, Proceeding CD*, Code 678, pp. 17 (2005).
10. Baecher, B. Gregory, and Christian, T. John, "Reliability & statistics in geotechnical engineering", *John Wiley & Sons Inc.* (2003).