

بررسی نتایج چندین آزمون دینامیکی شمع با دستگاه PDA و بیان برخی آموخته ها

احسان سیدی حسینی نیا

کارشناس ژئوتکنیک مهندسين مشاور ساحل، دانشجوي دکتری خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

تلفن همراه: ۰۹۱۲-۲۲۶-۳۴۹۸، پست الکترونیکی: esevedi@ut.ac.ir

چکیده: از دیرباز، مهندسان با مسائل مختلفی حین کوبش شمع مواجه بوده اند، نظیر لهیدگی ته یا سر شمع، شکستگی بدنه شمع و از همه مهمتر، نداشتن اطلاعات کافی جهت تعیین عمق نفوذ مورد نیاز. با بکارگیری تکنولوژی اندازه گیری امواج رفت و برگشتی ایجاد شده در شمع ناشی از اثر چکش، گامهای بلندی در امر رفتارنگاری کوبش شمع و چگونگی کوبش آن برداشته شد. هم اکنون کنترل مراحل شمع کوبی با دستگاه PDA (Pile Driving Analyzer) انجام می شود. در این مقاله به بیان کاربردهای عملی و بررسی چندین آزمون دینامیکی PDA انجام شده در جنوب کشور جهت جلوگیری از آسیب دیدگی شمع حین کوبش پرداخته شده است.

۱- مقدمه

مشکل اساسی در عملیات شمع کوبی که گریبانگیر طراحان و مخصوصاً پیمانکاران می باشد، عدم وجود اطلاعات کافی و دقیق از شرایط تحت‌الارضی زمین اطراف شمع در مواجهه با مشکلات حین کوبش می باشد. به عنوان مثال اگر یک شمع لوله‌ای در مسیر خود حین کوبش به لایه سنگی برخورد کند، نوک آن ممکن است دچار لهیدگی و تغییر شکل شود، در صورتیکه شمع با قدرت ضربات چکش به داخل خاک نفوذ می کند و این در حالی است که شمع دچار لهیدگی و آسیب شده است.

با استفاده از تکنیک اندازه‌گیری موج ناشی از ضربه چکش بر شمع، می‌توان به مطالعه رفتارنگاری کوبش و سلامتی شمع حین کوبش پرداخت. رفتارنگاری کوبش شامل بررسی تنش‌های ایجاد شده در نوک و ته شمع، بررسی احتمال صدمه در شمع، تعیین عملکرد چکش و اندازه‌گیری دقیق مقادیر فرو رفت و برجهندگی شمع در هر ضربه می‌باشد.

کاربرد دیگر این تکنیک، تعیین ظرفیت باربری درجای شمع می باشد. با پا به عرصه گذاشتن تکنیک اندازه‌گیری موج در شمع، محققان سعی کردند رابطه‌ای بین ظرفیت باربری درجا با پارامترهای مختلف پخش موج در شمع پیدا کنند. در اواسط دهه ۱۹۶۰، برای اولین بار اندازه‌گیری موج پخش شده با کمک اتصال کرنش‌سنج و شتاب‌سنج بر روی بدنه شمع حین کوبش انجام شد [۱]. نتایج تحقیق ابداع دستگاهی بنام PDA (Pile Driving Analyzer) بود که هم اکنون بطور گسترده در امر شمع کوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱). دستگاه PDA در حقیقت دیتالاگری (Data Logger) است که اطلاعات سیگنالهای ایجاد شده در کرنش‌سنج و شتاب‌سنج‌های نصب شده از روی بدنه شمع را جمع‌آوری می‌کند.

با توجه به وجود پروژه های مختلف بندرسازی در سواحل جنوبی کشور و حجم بالای عملیات شمع کوبی، استفاده از آزمون درجای PDA ضروری بنظر می‌رسد. در همین راستا، در مناطق مختلف سواحل جنوبی تعداد زیادی آزمون درجای PDA به منظور رفتارنگاری کوبش (بررسی ایجاد صدمه در شمع) و تعیین ظرفیت باربری درجای شمع در پروژه های مختلف انجام شده است. نظر به اینکه کار با PDA و تفسیر نتایج آن مهارت بالایی نیاز دارد، در این مقاله سعی شده تا به چندین نکته مهم در امر تشخیص صدمه در شمع پرداخته می‌شود. قبل از پرداختن به این مقوله، به طور خلاصه به چگونگی تعیین و ثبت امواج اشاره می‌شود.

۲- اندازه گیری موج در شمع

مطابق شکل ۱، امواج ایجاد شده در شمع توسط سنسورهای نصب شده بر بدنه، اندازه گیری شده و در دستگاه PDA ثبت می‌شوند [۲]. در این شیوه با اندازه‌گیری شتاب و کرنش و با توجه به جهت اعمال نیرو و تغییر شکل در محیط یک بعدی، می‌توان تنش و نیروی بوجود آمده در شمع را بدست آورد، به طوریکه داریم:

$$s = E.e \quad F = s.A \quad (1)$$

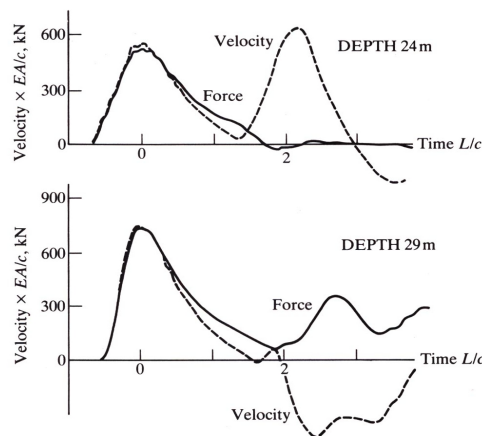
که در آن E ، مدول الاستیسیته بدنه شمع، σ تنش در مقطع شمع، ϵ کرنش بوجود آمده، F نیرو و A سطح مقطع شمع می‌باشد. با انتگرالگیری از شتاب و کرنش، به ترتیب سرعت و تغییر شکل نیز قابل محاسبه می‌باشد. تغییرات امواج ثبت شده نسبت به زمان را میتوان به صورت "مسیر موج" (Wave trace) مطابق شکل ۲ نمایش داد.



الف- نمایش دستگاه PDA، کابلهای اتصال و سنسورها

ب- اتصال سنسورها بر روی بدنه شمع از داخل قفسه فلزی در دریا

شکل ۱- تجهیزات و نحوه اجزای آزمون در جای PDA



شکل ۲- مسیر موجهای شتاب و نیرو در طول شمع

۱-۲- ضریب امپدانس شمع

امپدانس شمع (Z) به صورت زیر تعریف می شود:

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} \quad (2)$$

که در آن c، سرعت صوت در جسم شمع بوده که باتوجه به خصوصیات جنس تعیین می شود. با نوشتن روابط حرکت موج و تنش ایجاد شده درون محیط یک بعدی، می توان نشان داد که نیرو و سرعت ذرات محیط با این ضریب به هم وابسته هستند. به عبارت دیگر، با داشتن این پارامتر می توان روند تغییرات نیروهای اعمالی بر جدار شمع را بررسی نمود. با داشتن نیرو و سرعت، دو نوع موج از جنس نیرو قابل استخراج است: موج در حال حرکت به سمت پایین (W.D) و به سمت بالا (W.U) که نشان دهنده نحوه بسیج شدن خاک در جداره شمع می باشد. معمولاً مطالعات دینامیکی بر روی موج W.U انجام می گیرد. اگر شمع کوبی در خاک چسبنده انجام شود، مقدار موج W.U سریعاً زیاد شده تا اینکه به مقدار حداکثر خود در محل ته شمع به اوج خود می رسد، در صورتیکه در خاک غیرچسبنده این رشد بسیار ناچیز بوده تا اینکه در ته شمع به یک نقطه اوج می رسد. توضیح و تفسیر موجهای حاصل از اندازه گیری دینامیکی بسیار مفصل بوده و از حوصله این مقاله خارج است [۳، ۴، ۵ و ۶].

۲-۲- عدد نسبت β

با تغییر یافتن جنس مصالح (E) و سطح مقطع (A)، پارامتر Z نیز تغییر خواهد نمود. در نتیجه با مقایسه پارامتر Z در دو مقطع می توان به وجود تغییرات مقطع پی برد. با تعریف نسبت β داریم:

$$b = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3)$$

که در آن Z_1 و Z_2 ، مقادیر ضرایب امپدانس در دو مقطع از شمع می‌باشند. بدلیل پیوسته بودن مقطع شمع، مقدار β از روابط دیگر که وابسته به تغییرات نیرو و سرعت در بدنه شمع می‌باشد، تعیین می‌گردد. (Rausche and Gobble (1976) تشخیص مقدار خسارت ایجاد شده در شمع را بر اساس β بیان کرده‌اند. در تخمین مقدار صدمه بدنه شمع با کمک نسبت β باید گفت که وجود مقادیر β کمتر از ۱/۰ در طول شمع همیشه نشانگر خسارت در بدنه نیست، بلکه ممکن است بخاطر عوامل دیگر نظیر خطای اندازه‌گیری (ناشی از شرایط بد اتصال سنسورها) و یا فقط وجود یک منطقه آسیب دیده بجای چندین منطقه صدمه دیده باشد (نمایش مکانهای مجازی خسارت دیده).

۳- کاربردهای آزمون دینامیکی شمع با PDA

با توجه به اینکه با این تکنیک می‌توان روند تغییرات نیرو و سرعت پخش شده در جسم شمع را اندازه‌گیری نمود، به پارامترهای مختلف و گوناگون دخیل در شمع کوبی می‌توان دست یافت [۶،۷،۵].

۳-۱- تعیین بازدهی شمع کوب

با اندازه‌گیری انرژی اعمال شده بر سر شمع (با استفاده از تنش و شتاب اعمالی ناشی از شمع کوب) و مقایسه آن با حداکثر انرژی نامی شمع کوب، راندمان چکشها تعیین می‌شود. بدین صورت می‌توان شرایط شمع کوب را با توجه به نوع آن، نوع خاک محل و شرایط شمع کوبی سنجید و از هزینه‌های اضافی جلوگیری نمود.

راندمان شمعکوبهای دیزلی به عوامل متعددی نظیر مقدار سوخت، نسبت وزن کوبه به وزن شمع و از همه مهمتر سختی خاک وابسته می‌باشد. با بررسی و تحلیل تعداد زیادی از ضربات شمع کوبی در جنوب کشور که در آنها از D100-13، D62-22 و Kobe K45 استفاده شده‌اند، مشاهده می‌شود که راندمان متوسط شمع کوب ۱۷٪ با انحراف معیار ۳٪ بوده است. به عبارت دیگر، با احتساب یک توزیع نرمال، احتمال وقوع ۹۵٪ راندمان، در بازه ۱۸٪-۱۶٪ می‌باشد. شایان ذکر است که در این موارد، مقدار سوخت حداکثر بوده (استفاده از آخرین درجه چکش) که در نتیجه تأثیری در عملکرد چکش نداشته است. شاید بتوان گفت که بهتر است که این مقدار عملکرد با شرایط شمع کوبی مقایسه شود [۸].

۳-۲- تشخیص صدمه در نوک شمع

در مواقعی که شمع کوبی در یک لایه سنگی و یا لایه خاکی بسیار متراکم به صورت Hard Driving (انرژی بالای شمع کوب و مقدار کوچک فرو رفت شمع) انجام گیرد، خطر لهیدگی و جمع شدگی نوک شمع (pile toe) وجود دارد که در اکثر موارد ادامه شمع کوبی میسر نبوده و بایستی شمع کوبیده شده خارج شود. اینجاست که می‌توان با بررسی امواج بوجود آمده در بدنه شمع و بررسی تغییرات شکل امواج تنش و نیروهای بوجود آمده از این اتفاقات جلوگیری بعمل آورد. در ادامه به چندین روش تشخیص و ارزیابی صدمه در نوک شمع اشاره می‌شود.

- برگشت مقدار موج W.U در طولی کمتر از طول واقعی شمع
- وجود نقطه‌ای با $\beta < 1.0$ در نزدیک ته شمع در ضربات پی در پی
- بیشتر شدن تنش حداکثر فشاری در نوک شمع (CSB) از مقادیر تنش تسلیم جنس شمع (CSY)
- برای پیشگیری از لهیدگی سر شمع نباید اجازه داد که ظرفیت باربری در جای RMX (یکی از روشهای تعیین ظرفیت باربری بر اساس روش CASE) از مقدار نیروی اندازه‌گیری شده در سر شمع (FMX) بیشتر شود. در تعیین RMX مقدار حداکثر میرایی $J=0.4$ اختیار شود.

۳-۳- تشخیص صدمه در سر شمع (pile head)

جهت جلوگیری از لهیدگی سر شمع، به این نکات باید توجه داشت:

- حداکثر تنش اندازه‌گیری شده در سر شمع ناشی از دو جفت سنسور (CSI)، در حد متوسط حداکثر تنش‌های اندازه‌گیری شده در سر شمع (CSX) باشد. این معیار اجازه نمی‌دهد تا شمع کوب به صورت نامتقارن بر سر شمع ضربه زند و موجب لهیدگی بخشی از آن گردد.

- مقایسه حداکثر تنش اعمالی اندازه‌گیری شده در سرشمع (CSX) با تنش فشاری مجاز حد تسلیم جنس شمع

۳-۴- تشخیص صدمه در بدنه شمع

همانطور که گفته شد، بدلیل وجود تغییرات نیرو و سرعت در موج W.U، بهترین روش ارزیابی سلامت بدنه، بررسی تغییرات W.U می باشد که در نتیجه محل شکستگی و آسیب در طول شمع، مشخص می شود. روش دیگر بررسی وجود ضریب $\beta < 1.0$ در یک نقطه از شمع در چندین ضربه متوالی می باشد.

۳-۵- ظرفیت باربری درجای شمع

با اندازه گیری تغییرات امواج نیرو و سرعت در شمع و استفاده از روش CASE می توان ظرفیت باربری درجای شمع را تخمین زد. همچنین، با انجام تحلیل CAPWAP بر رکورد موج ثبت شده، می توان با دقت بالایی، به ظرفیت باربری درجای شمع رسید. در آنالیز CAPWAP، پارامترهای بسیار متنوعی وجود دارند که بدیهی است تنها با انتخاب مقدار صحیح این پارامترها جواب واقعی نتیجه می شود [۹]. هدف از این تحلیل، انطباق موج مدل شده در نرم افزار با موج واقعی اندازه گیری شده می باشد.

۴- انجام آزمون درجای PDA

در ادامه به ارائه دو مورد از تستهای PDA انجام شده پرداخته می شود.

۴-۱- کوبش مونوپایل دلفین پست اسکله ۴ بندر پتروشیمی پارس

برخی از شمعهای دلفین اسکله شماره ۴ بندر پتروشیمی پارس واقع در منطقه عسلویه (مقطع لوله ای به قطر ۵۶ اینچ و ضخامت ۱/۹ سانتیمتر)، به عمق مورد نیاز مدفون شدگی نرسیده بودند. شمع کوب مورد استفاده از نوع Delmag 62-22 بوده است. از اینرو، کارفرما خواستار کوبش شمعهای مورد نظر با شمع کوب سنگین تر Delmag 100-13 شد. ولی کماکان تردید خراب شدگی و لهیدگی نوک شمع به دلیل وجود یک لایه سخت سنگی و یا خاک متراکم وجود داشت. در این مرحله، کارفرما تصمیم گرفت تا به کمک دستگاه PDA، نحوه فرورفت شمع با هر دو نوع چکش احتمال آسیب دیدگی آن بررسی شود. یک شمع کششی که قبلاً تا عمق ۶/۶ متری بستر دریا به حالت Refusal رسیده بود، جهت تست PDA انتخاب گردید. در تست اول با شمع کوب D62-22، با مشاهده و بررسی خطوط امواج سرعت (V)، نیرو (F) و موج برگشتی (WU)، موارد زیر نتیجه گیری می شود:

- آزمون فوق، طول مدفون شدگی ۶/۶ متر پایین تر از سطح بستر دریا را تایید می کند.
 - در تمام ضربات، نوک شمع سالم است.
 - فرورفت شمع به ازاء هر ضربه، کمتر از ۱ mm می باشد که نشانگر عدم توانایی فرو بردن شمع با شمع کوب D62-22 می باشد.
 - در اکثر ضربات، راندمان شمع کوب کمتر از ۲۰٪ بوده است.
- تست دوم با شمع کوب قویتر D100-13 انجام شد. در این تست، با بررسی امواج بدست آمده در هر ضربه چکش حین شمع کوبی، مشاهده می شود که:

- شمع بصورت Easy driving به داخل خاک فرو می رود.
 - فرورفت میانگین شمع به ازاء هر ضربه، معادل ۸ میلیمتر می باشد.
 - در طول شمع کوبی با چکش D100-13، نوک شمع سالم می باشد.
 - با اینکه انرژی حاصل از شمع کوب باعث فرو بردن شمع به داخل بستر می شود، با این حال از ماکزیمم انرژی چکش استفاده نمی گردد. (کمتر از ۳۰٪ حداکثر انرژی نامی چکش)
- مع الوصف، شواهد بدست آمده از نتایج تست PDA نشان داد که در آن منطقه کوبیدن شمعها با چکش D62-22 مناسب نیست و بایستی از چکش D100-13، جهت کوبش شمع برای رسیدن به عمق مورد نظر استفاده شود.

۴-۲- کوبش مونوپایل دلفین در پست اسکله ۵ بندر پتروشیمی پارس

در آذرماه ۱۳۸۳، یکی از مونو پایل های اسکله شماره ۵ بندر پتروشیمی پارس جنوبی بدلیل برخورد آن با قطعه سنگ بزرگ در بستر دریا در عمق فرورفت ۷/۵ متری، دچار لهیدگی گردید، بطوریکه امکان خارج کردن آن از بستر نبود و باعث متوقف شدن پروژه به مدت حدود

یک سال شد. سرانجام تصمیم گرفته شد یک شمع لوله ای جدید به قطر ۷۰ اینچ متر به ضخامت ۲ سانتیمتر به فاصله ۲/۵ متری از محل قبلی با شمع کوب Delmag 100-13 کوبیده شود. در این کوبش جدید، تست PDA جهت رفتارنگاری کوبش، به کار گرفته شد. با نزدیک شدن به عمق نفوذ ۷ متری، تعداد ضربات روند صعودی پیدا کرد. با مشاهده روند افزایشی فرورفت شمع به داخل خاک و بررسی همزمان تنشهای اعمالی بر شمع، بررسی شکل امواج و مقادیر β ، نمایان شد که با اینکه لایه های بستر سخت تر شده اند، با وجود این مانعی برای نفوذ شمع ایجاد نکردند. با توجه به نتایج خروجی PDA در محل و بررسی تنش های بدست آمده در شمع نتیجه گرفته شد که شمع در چند مورد با لایه سختی برخورد داشته، ولی بدون آسیب جدی (در نوک و جدار) از آن عبور کرده است. با ادامه شمع کوبی، شمع تا عمق ۱۳/۴ متری بدون هیچ مشکلی فرورفته و نتایج PDA هم تاییدی بر عدم وجود آسیب شمع داشته است.

۵- خلاصه و نتیجه گیری

- ۱- بدلیل عدم قطعیت از شرایط تحت الارضی زمین در محل کوبش شمع و وجود احتمال آسیب دیدگی در آن، رفتارنگاری کوبش شمع با دستگاه (PDA) ضرورت می یابد.
- ۲- با استفاده از دستگاه PDA موج ایجاد شده در شمع ناشی از ضربه چکش بر آن، ثبت شده و سپس با کمک شبیه سازی عددی عملیات شمع کوبی و موج ایجاد شده، می توان اطلاعات مفیدی از شرایط شمع و خاک حین عملیات شمع کوبی کسب کرد.
- ۳- به طور خلاصه، هدف از انجام آزمایش دینامیکی شمع با دستگاه PDA به شرح زیر می باشد:
 - رفتارنگاری کوبش شمع شامل تعیین بازدهی شمع کوب، تشخیص صدمه در شمع (سر، نوک و بدنه شمع)
 - تعیین ظرفیت باربری در جای شمع همزمان با انجام آزمایش که نشانگر نمو مقاومت جدار و مقاومت شمع کوبی می باشد. (با رفتارنگاری دینامیکی شمع با PDA، به تنهایی نمی توان ظرفیت نهایی شمع را تخمین زد و احتیاج به آنالیز CAPWAP می باشد).

۶- تشکر و قدردانی

در پایان از زحمات تیم کارگاهی شرکت ساختمانی پرهام، موسسه عمران ساحل و شرکت ساختمانی پل صنعت جهت همکاری و ایجاد شرایط مناسب برای انجام آزمون PDA تشکر و قدردانی می گردد.

۷- مراجع

- [1] Rausche, F., "Soil Response from Dynamic Analysis and Measurements on Piles", Ph.D thesis, Case Western University, Cleveland, Ohio, 1970
- [2] PDI, Pile Dynamics Inc., address: <http://www.pile.com>
- [3] Goble, G.G., Rausche, F., and Linkins, G.E., "The analysis of pile driving. A State-of-the-Art", The 1st Seminar on the Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm, Sweden, 1980
- [4] Rausche, F., G. Linkins and Shen Ren Kung, "Pile integrity testing and Analysis", Proc. 4th International Conference on the application of stress-wave Theory to Piles, The Hague, Netherlands, 1992
- [5] Hussein, M. and Rausche, F. (1991), "Determination of driving induced pile damage", Foundations Profondes, L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, France.
- [6] Hussein, M., Linkins G., "Dynamic testing of pile foundations during construction", Proc. of Structures Congress XIII, Structural Division/ ASCE, Boston, Massachusetts, 1995
- [7] Rausche, F., and G. Goble, "Determination of pile damage by top measurements", Behavior of Deep Foundations (Raymond Lundgren, ed.), Special Technical Publication 670. ASTM, Philadelphia, Pa., 1976, pp.500-506.
- ۸- سیدی حسینی نیا، احسان، ۱۳۸۵، "تعیین یک رابطه ساده ظرفیت باربری درجای شمع مبتنی بر اندازه گیریهای محلی"، هفتمین همایش بین المللی مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، تهران، ایران.
- [9] Pile dynamics, Inc., "CAPWAP: CAsE Pile Wave Analysis Program" manual, 2000, Cleveland, Ohio, USA