

تعیین رابطه تقریبی ظرفیت باربری در جای شمع با اندازه گیری های محلی

احسان سیدی حسینی نیا

کارشناس ژئوتکنیک، مهندسین مشاور ساحل، دانشجوی دکتری خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

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

چکیده: با بکارگیری تکنولوژی اندازه گیری امواج رفت و برگشتی ایجاد شده در شمع ناشی از اثر چکش، کنترل مراحل شمع کوبی با دستگاه PDA (Pile Driving Analyzer) انجام می شود. همچنین، به کمک یک روش تحلیلی مبتنی بر مقایسه امواج واقعی پخش شده در شمع با امواج مدل شده، می توان ظرفیت باربری شمع را با دقت خوبی تعیین کرد (CAPWAP Analysis). با توجه به اینکه در سواحل جنوبی کشور، تجربه انجام چندین آزمون دینامیکی کوبش شمع با دستگاه PDA بوده و در اکثر این موارد ظرفیت باربری درجا با آنالیز CAPWAP تعیین شده است، می توان با مقایسه نتایج این تحلیلها و روابط دینامیکی کوبش شمع، رابطه ای تقریبی بر پایه اندازه گیری های محلی نظیر مقدار نفوذ و برچهندگی شمع در هر ضربه، بدست آورد. به طوریکه در شرایط عدم امکان انجام آزمون PDA، بتوان ظرفیت باربری درجای شمع را تخمین زد. همچنین در این مقاله، توصیه هایی جهت انتخاب پارامترهای مناسب در رابطه ارائه شده، بیان شده است.

۱- مقدمه

هدف از طراحی شمع، تعیین ابعاد و عمق نفوذ شمع در بستر خاک جهت تحمل بار وارد بر آن می باشد. روابط تئوریک و کلاسیک مختلفی پیشنهاد شده اند، بطوریکه به متغیرهای مختلف خاک وابسته بوده که مطمئناً عوامل مختلفی در ایجاد خطا در آنها نقش دارند. این امر باعث شده که مهندسان از دیرباز به فکر تعیین ظرفیت باربری شمع به طور مستقیم به کمک آزمون های برجا باشند. مقاومت شمع در حال کوبش نسبت به مقدار نفوذ آن در خاک می تواند یک راه مناسب برای تعیین ظرفیت باربری باشد. به عبارتی هر چه نفوذ شمع در خاک سخت تر باشد، می تواند بار بیشتری را تحمل کند. بر پایه این اصل، روابط دینامیکی کوبش شمع (Dynamic pile driving formula) توسط محققان برای شرایط مختلف ارائه شدند.

از میان آزمونهای برجا که جوابهای دقیقی در تعیین ظرفیت باربری شمع می دهد، می توان به بارگذاری استاتیکی و آزمون PDA اشاره نمود. البته باید گفت که دقت روش بارگذاری استاتیکی بالاتر از آزمون دینامیکی (PDA) می باشد. با این حال، انجام بارگذاری استاتیکی در مقایسه با PDA بسیار هزینه بر و وقت گیر و گاهی اوقات غیرممکن می باشد.

هم اکنون، در سواحل جنوبی کشور، تجربیات گوناگونی در مورد تعیین ظرفیت باربری درجای شمع اعم از استفاده از روابط کوبش، تست PDA و بارگذاری استاتیکی شمع وجود دارد. با توجه به سادگی استفاده از روابط کوبش و امکان انجام آن در سخت ترین شرایط و از طرفی اینکه در کشور ما ایران، استفاده از آزمایشات دینامیکی بر پایه تحلیل پخش موج، آنچنان مرسوم نشده است، در این مقاله سعی شده تا به ارزیابی یک رابطه تقریبی تعیین ظرفیت باربری شمع بر پایه نتایج آنالیز CAPWAP بپردازیم.

۲- گذری بر روابط دینامیکی کوبش شمع

در شمع کوبی، وزنه چکش با توجه به انرژی که دارد به سر شمع ضربه وارد می کند که این ضربه باعث فروبردن شمع به داخل خاک می شود. رابطه اساسی شمع را می توان به کمک اصل بقا انرژی و یا روابط اصل مومنوم و ضربه، استخراج کرد [۱ و ۲]. شکل معادله عمومی رابطه دینامیکی شمع به صورت زیر است:

$$h_i h_c E_h = \frac{1}{2} R_U \cdot s + R_U \cdot c \quad (1)$$

که در آن:

R_U : ظرفیت باربری برجای شمع

E_h : انرژی نامی چکش

s : فرورفت شمع در هر ضربه (set)

c : مجموعه تغییر شکل های ارتجاعی

η_i : راندمان شمع کوب

η_c : راندمان ضربه که به نسبت وزن شمع و وزن کوبه چکش بستگی دارد.

هم اکنون، تعداد این روابط به بیش از ۴۵۰ عدد می‌رسد که دلیل آن، در نظر گرفتن شرایط و عوامل مختلف در شمع کوبی نظیر جنس، طول و سطح مقطع شمع، نوع خاک و نوع شمع کوب می‌باشد [۲]. شرح کامل، چگونگی و شرایط استفاده از این روابط در مرجع [۳] ارائه شده است.

۳- گذری بر تکنیک اندازه‌گیری موج

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 سر و نوک شمع، بررسی احتمال صدمه در شمع، تعیین عملکرد چکش و اندازه‌گیری دقیق مقادیر فرو رفت و برجهندگی شمع در هر ضربه می‌باشد. کاربرد مهم دیگر این روش، تعیین ظرفیت باربری درجای شمع می‌باشد. 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 [۴].

در اولین مدلی عددی برای شبیه‌سازی کوبش، بخش‌های مختلف دخیل در سیستم شمع کوبی نظیر کوبه چکش، سندان، بالشتک و بدنه شمع بصورت جرم‌های متمرکزی انتخاب شده توسط فنرهایی به هم متصل بودند. جهت مدل کردن رفتار اندرکنشی خاک و شمع، از فنرها و میراگرهایی میان المانهای شمع و خاک در نظر گرفته شد [۵]. حال می‌توان با اعمال ضربه از سوی جرم کوبه به اولین قطعه شمع، شمع کوبی را شبیه‌سازی نمود. تحلیل تا هنگامی ادامه می‌یابد که جابجایی انتهایی ترین قطعه جرم شمع متوقف شود.

در دهه ۱۹۷۰، با تلاش Gobble و همکارانش در دانشگاه Case University، موفق به اندازه‌گیری موج در شمع در حال کوبش و ابداع دستگاه (PDA) (Pile Driving Analyser) شدند [۴]. در این راستا، روشی بنام CASE جهت تعیین ظرفیت باربری در جای شمع بر پایه مقادیر موج نیرو و سرعت در شمع ارائه شد. این روش، ویرایش‌های گوناگونی دارد و هم اکنون توسط مهندسان به همراه آزمایش رفتارنگاری کوبش شمع جهت تخمین ظرفیت باربری استفاده می‌شود.

در ادامه تلاش‌های ارتقای کاربرد پخش موج، برنامه‌ای به نام Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) جهت مقایسه موجهای ثبت شده در محل با موجهای حاصل از مدل‌سازی و انطباق این دو با هم نوشته شد [۶]. اساس مدل‌سازی شمع کوبی در این نرم‌افزار همان مدل Smith می‌باشد. در این روش موج ثبت شده در سر شمع به مدل فوق اعمال می‌گردد. سپس با تکرار آنالیزها، پارامترهای مختلف خاک اطراف شمع آن قدر تغییر می‌کنند تا اینکه موج شبیه‌سازی شده برگشتی با موج واقعی برگشتی منطبق شود و بهترین تطابق بین نتایج واقعی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی بدست آید [۷]. شایان ذکر است که با این شیوه مدل‌سازی، علاوه بر ظرفیت باربری کلی، سهم باربری نوک و جدار، مقدار فرورفت و برجهندگی در هر ضربه و پارامترهای خاک نظیر Quake و میرایی (جهت مدل‌سازی خاک در گامهای بعدی) بدست می‌آید.

۴- تعیین رابطه تقریبی جهت تخمین ظرفیت باربری درجای شمع

با توجه به قابلیت اندازه‌گیری موج در تعیین دقیق مقادیر فرورفت شمع و ظرفیت باربری درجای آن، می‌توان یک رابطه نیمه تئوری-نیمه تجربی برای یک منطقه با یک نوع خاک بدست آورد. این امر با مقایسه نتایج آنالیز CAPWAP و روابط دینامیکی میسر باشد. با توجه به اینکه تعداد زیادی آزمایش PDA و آنالیز CAPWAP روی شمعهای منطقه جنوبی کشور انجام شده، در این بخش به ارائه یک رابطه تقریبی برای تعیین ظرفیت باربری درجای شمع بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی ارائه می‌شود. قابل ذکر است که جامعه آماری در نظر گرفته شده، مشتمل بر تعداد ۳۲ رکورد موج بوده و تحت آنالیز CAPWAP قرار گرفته اند. در تمام مجموعه داده‌ها، نقاط مشترک زیر وجود دارند:

- ۱- مقطع شمع‌ها لوله ای (ته باز) و از جنس فولاد بوده و قطر شمع‌ها در محدوده ۵۶-۴۰ اینچ بوده است.
- ۲- طول شمع‌ها در محدوده ۴۰-۳۰ متر می‌باشد.
- ۳- شمع کوب‌های مورد استفاده از نوع Delmag100-13 و Kobe 45 بوده اند.
- ۴- تمام عملیات شمع کوبی در منطقه جنوبی در سواحل خلیج فارس (در حد فاصل عسلویه تا کنگان) انجام گرفته اند (شکل ۱). بافت خاک این منطقه اکثراً درشت دانه (GM, GC) بوده و در لایه‌های میانی، لایه ریزدانه (CL, CL-ML) وجود دارد. درصد کرناتنه خاک در این منطقه بالاست (حدود ۵۰٪).

در یک رابطه دینامیکی کوبش بر طبق رابطه (۱)، نسبت ظرفیت (R_U) با پارامترهای مختلف به صورت زیر است:

$$R_U \propto E_x, \frac{1}{s}, \frac{1}{c} \quad (2)$$

که در آن s مقدار فرورفت شمع در ضربه (set)، c مقدار برجهندگی (rebound) شمع در ضربه، E_x انرژی اعمالی از طرف چکش (این مقدار دربرگیرنده اثر ضربه (h_c) و راندمان چکش (h_i) می باشد) و R_U ظرفیت باربری درجای شمع می باشد. پارامتر برجهندگی شامل تغییر شکلهای الاستیک مجموعه خاک و شمع می باشد که علاوه بر اندازه گیری های محلی، با آزمایش PDA و آنالیز CAPWAP نیز بدست می آید. جدول ۱ مشخصات بهترین رکوردهای ثبت شده از هزاران ضربه وارد بر شمع های مختلف ارائه شده است. در این جدول، نوع شمع کوب مورد استفاده، مقدار حداکثر انرژی و راندمان آن در ضربه، و نتایج آنالیز CAPWAP شامل مقادیر تغییرمکان حداکثر شمع، ضربه فرورفت و برجهندگی و نهایتاً ظرفیت باربری نشان داده شده است. شایان ذکر است که نوع ظرفیت باربری تعیین شده، درجا بوده و جهت تعیین ظرفیت نهایی بایستی پس از گذشت مدت زمان لازم از شمع کوبی بر اساس نوع خاک (جهت گرفتگی یا آزاد شدن خاک اطراف شمع)، کوبش مجدد (Redriving) و آنالیز CAPWAP انجام گیرد.

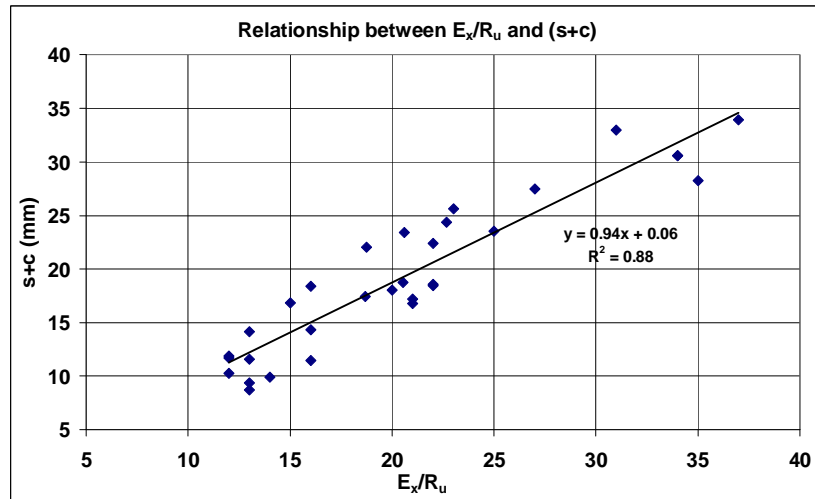


شکل ۱- نمایش مکان انجام آزمونهای درجای PDA در سواحل جنوبی ایران

جدول ۱- مشخصات جامعه آماری امواج ثبت و تحلیل شده

	Depth (m)	Hammer Type	Maximum Hammer Energy- Eh (kN.m)	Measured hammer Energy (kN.m)	Hammer Efficiency (%)	CAPWAP ANALYSIS RESULTS			
						Maximum Displacement (DMX) (mm)	Set (DFN) (mm)	Rebound (mm)	Pile Capacity (ton)
									Total
Khadamati Service Port (March 2004)	8	D100-13	406.5	54	13	27	1	26	196
	8.5	D100-13	406.5	69.7	17	35	4	31	247
	9	D100-13	406.5	76.2	19	34	3	31	249
	9	D100-13	406.5	76.2	19	34	3	31	249
	9.5	D100-13	406.5	69.9	17	31	5	26	212
	10	D100-13	406.5	67.2	17	37	3	34	198
	10.5	D100-13	406.5	71.6	18	25	3	22	304
	11	D100-13	406.5	61.3	15	22	2	20	330
	11.5	D100-13	406.5	59.3	15	22	2	20	321
	12	D100-13	406.5	61	15	21	2	19	364
	12.5	D100-13	406.5	52.3	13	20	3	17	290
	13	D100-13	406.5	72.8	18	23	2	21	284
	13.5	D100-13	406.5	63	15	21	2	19	366
	14	D100-13	406.5	67	16	22	2	20	299
Khadamati Service Port (Aug. 2005)	22.8	D100-13	406.5	103.8	26	16	5	11	563
	22.8	D100-13	406.5	97	24	15	4	11	577
	24.2	D100-13	406.5	62.1	15	14	1	13	626
	24.2	D100-13	406.5	82.4	20	16	4	12	575
	22.4	D100-13	406.5	100.4	25	16	4	12	875
Sarooj Port (September 2005)	21	K-45	128.5	16.35	13	13	2	11	188
	21	K-45	128.5	19.8	15	13	6	7	211
	21	K-45	128.5	20.5	16	12	1	11	175
	21	K-45	128.5	22.1	17	12	3	9	215
	21	K-45	128.5	20.5	16	12	1	11	173
	21	K-45	128.5	24.6	19	13	2	11	174
	21	K-45	128.5	22.5	18	13	3	10	194
	21	K-45	128.5	22.5	18	13	3	10	194
Petrochemical Port (October 2004)	11	D100-13	406.5	57.7	14	19	17	2	262
	10	D100-13	406.5	51.2	13	21	19	2	273
	8.5	D100-13	406.5	62.6	15	19	15	4	359
	7.5	D100-13	406.5	58.5	14	21	16	5	250
	7	D100-13	406.5	57.3	14	23	18	5	235
	6	D100-13	406.5	50.8	13	25	21	4	145
	6.6	D100-13	406.5	52.0	13	12	1	11	497
	8.3	D100-13	406.5	83.3	20	25	16	9	300
	6.65	D100-13	406.5	100.9	25	22	5	17	424
	6.6	D100-13	406.6	88.4	22	20	6	14	330
Average					17				
Standard Deviation					4				
C.O.V.					0.2				

با توجه به در اختیار داشتن پارامترهای مختلف و بر اساس رابطه (۲)، می توان دو دسته پارامتر به صورت $\frac{E_x}{R_U}$ و $M = s + c$ در نظر بگیریم. در صورت رسم این دو پارامتر ترکیبی، می توان به رابطه خطی بین آنها مطابق شکل ۲ رسید.



شکل ۲- نمایش رابطه $\frac{E_x}{R}$ و $M = s + c$ برای رکوردهای ثبت شده در منطقه جنوب

با عنایت به اینکه مقدار رگرسیون این دسته داده نزدیک به واحد بوده ($R^2=0.88$) می توان نوشت:

$$(s + c) \approx \frac{E_x}{R_U} \Rightarrow R_U = \frac{E_x}{s + c} \quad (3)$$

به عبارتی، با تخمین صحیحی از انرژی منتقل شده به شمع، مقدار فرورفت و برجهندگی در هر ضربه، می توان به ظرفیت باربری درجای شمع رسید. مجددا تاکید می شود که در استفاده از این رابطه کوبش، بایستی شرایط شمع کوبی اعم از نوع شمع (سطح مقطع، طول، وزن)، نوع شمع کوب و نوع خاک محل در نظر گرفته شود. در ادامه، چندین نکته در خصوص تخمین صحیحی از متغیرهای مورد نیاز بیان می شود.

۴-۱- تخمین متغیرها

۱- تعیین E_x : با بررسی جامعه آماری رکوردهای امواج، مشاهده می شود که بازده شمع کوبهای استفاده شده با در نظر گرفتن توزیع نرمال و احتمال وقوع ۹۵٪، بین ۱۶٪ تا ۱۸٪ بوده است. توصیه می شود که از این بازه برای راندمان چکش استفاده شود (حداکثر ۲۰٪). در نتیجه مقدار E_x برابر است با:

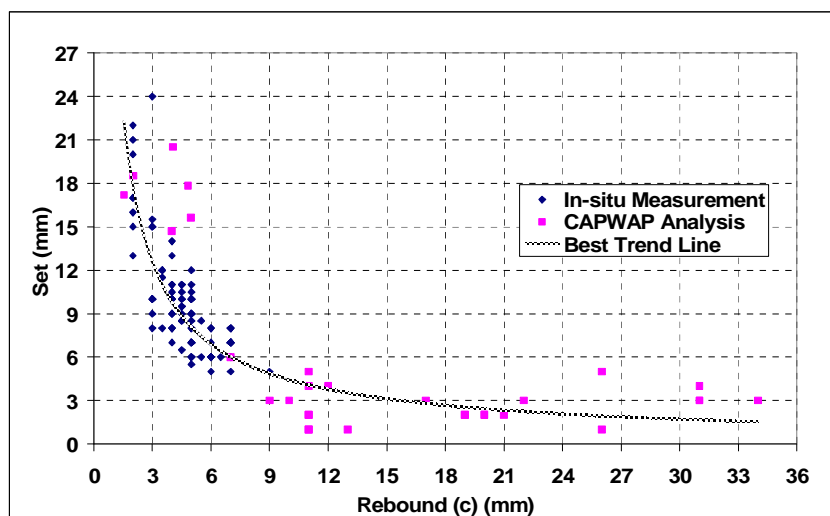
$$E_x = a.E_h \quad (4)$$

که E_h و α به ترتیب مقدار انرژی حداکثر نامی شمع کوب و مقدار راندمان آن می باشد.

۲- تعیین فرورفت (s): با مدرج کردن بدنه شمع و شمارش تعداد ضربات حین نفوذ، مقدار متوسط s تعیین می شود. با انتخاب فاصله درجه بندی حدود ۲۰ سانتیمتر، می توان به مقدار s با دقت قابل قبولی دست یافت.

۳- مقدار برجهندگی: با چسباندن یک کاغذ بر بدنه شمع و قراردادن مدادی در یک تکیه گاه ثابت کنار شمع، می توان حرکت شمع شامل مقدار نفوذ و برجهندگی را اندازه گیری نمود.

در صورتیکه این اندازه گیری محلی به هر دلیل امکان پذیر نباشد، توصیه می شود که از تجربه های قبلی جهت تخمین برجهندگی شمع استفاده شود. در شکل ۳، مقادیر فرورفت نسبت به مقادیر برجهندگی مشتمل بر دو گروه رسم شده اند. اولین گروه مربوط به مقادیر اندازه گیری شده از آزمون برجای PDA و آنالیز CAPWAP بوده، در صورتیکه دومین گروه، از اندازه گیری حرکت شمع به طور مستقیم (ترسیم حرکت شمع با مداد روی کاغذ چسبیده شده بر بدنه شمع) بدست آمده است. با در نظر گرفتن هر دو گروه و ارتباط دادن مقادیر نفوذ و برجهندگی جامعه آماری موجود و برازش کردن یک خط از میان آنها، می توان نموداری ارائه نمود تا بتوان بر اساس مقدار نفوذ، مقدار برجهندگی را تخمین زد.



شکل ۳- رابطه بین فرورفت و برجهنگی شمعها در هر ضربه در خاک جنوب

۵- خلاصه و جمع بندی

با پیشرفت تکنولوژی و استفاده از تکنیک اندازه گیری موج ناشی از شمع کوب بر شمع، روشهای نوینی جهت تخمین ظرفیت باربری شمع نظیر آنالیز CAPWAP ابداع شد که در مقایسه با روش بارگذاری استاتیکی، دقت قابل ملاحظه ای دارد. حتی اینکه این روش، سریعتر، کم هزینه تر و بسیار راحتتر انجام می گیرد. از طرفی، با در نظر گرفتن شرایط یکسان در شمع کوبی می توان با کمک روابط کوبش، ظرفیت باربری درجای شمع را تخمین زد. در این مقاله، با کمک آنالیز CAPWAP و تعیین پارامترهای دخیل در روابط کوبش شمع، توانستیم یک رابطه کوبش ساده بر اساس اندازه گیری های محلی جهت تخمین ظرفیت باربری درجای شمع ارائه کنیم. در پایان، توصیه هایی جهت انتخاب پارامترهای موجود در رابطه فوق بیان شد.

۶- مراجع

[1] The overseas coastal area development institute of Japan, "Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan (OCDI 2002)", Japan, P.P. 600

[2] Bowles, Joseph E., 1996, "Foundation Analysis and Design", McGraw-Hill, P.P. 1175

۳- سیدی حسینی نیا، احسان، ۱۳۸۴، "روابط دینامیکی کوبش شمع و کاربرد آنها در تعیین ظرفیت باربری شمع"، دومین کنگره ملی عمران، دانشگاه علم و صنعت

[4] Rausche, F., "Soil Response from Dynamic Analysis and Measurements on Piles", PhD thesis, Case Western University, Cleveland, Ohio, 1970

[5] Smith, E.A.L., (1960), "Pile driving analysis by the wave equation", ASCE Journal for soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 86, -SM4.

[6] Goble, G.G., and Rausche, F., "Wave equation analysis of piles driving-WEAP program", Volumes 1 through 4, FHWA IP-76-13.1 through IP-76-14-4, April 1976 with an update in March 1981.

[7] Pile dynamics, Inc., "CAPWAP: CAse Pile Wave Analysis Program" manual, 2000, Cleveland, Ohio, USA