

# کاربرد روابط دینامیکی کوبش در تعیین ظرفیت باربری شمع

احسان سیدی حسینی نیا، دانشجوی دکترای خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

تلفن: ۰۹۱۲-۲۲۶۳۴۹۸ پست الکترونیکی: [esevedi@ut.ac.ir](mailto:esevedi@ut.ac.ir)

## چکیده

به دلیل عدم قطعیت هایی که در تعیین ظرفیت باربری شمع در استفاده از روابط کلاسیک وجود دارد و همچنین وجود تغییراتی در پروفیل خاک که در مطالعات ژئوتکنیک دیده نمی شود، استفاده از آزمونهای برجای شمع جهت تعیین ظرفیت باربری لازم به نظر می رسد. یکی از انواع این آزمونها، استفاده از روابط دینامیکی کوبش شمع می باشد که با اندازه گیری مقدار فرورفت می توان ظرفیت باربری شمع را تخمین زد. با اندازه گیری برجای برجهنگی می توان دقت روابط فوق را افزایش داد. باید دانست که جهت تخمین درست ظرفیت باربری، لازم است مقادیر بدست آمده از این روابط با آزمایش بارگذاری استاتیکی کالیبره شوند. در این مقاله، ابتدا به معرفی مختصر روابط دینامیکی کوبش پرداخته شده و سپس شرایط مختلف استفاده از آنها شرح داده می شود.

**کلید واژه ها:** ظرفیت باربری شمع، روابط دینامیکی کوبش، فرورفت، برجهنگی

## ۱-مقدمه

هدف از طراحی شمع، تعیین ابعاد و عمق نفوذ شمع در بستر خاک می باشد تا بتواند بار وارد بر آن را تحمل کند. جهت استفاده از روابط تئوریک و کلاسیک، متغیرهای مختلف خاک نظیر زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته و غیره نیاز می باشد که با کمک آزمون های برجا و آزمایشگاهی تعیین میشوند 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.

آزمون های برجای شمع شامل آزمون های استاتیکی و دینامیکی می باشد. با توجه به اینکه بار اعمالی بر شمعهای طراحی شده به صورت ضربه ای یا دینامیکی نمی باشند، آزمون های استاتیکی درجا نظیر آزمایش بارگذاری استاتیکی، نتایج دقیق تر و معتبرتری را نسبت به آزمون های برجای دینامیکی، ارائه می کنند. با این حال، انجام این آزمایش مدت زمان زیادی را نیاز دارد.

علاوه بر انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع، می توان با کمک یک سری روابطی به نام روابط دینامیکی کوبش شمع، تخمینی از ظرفیت باربری شمع های در حال کوبش بدست آورد. با پیشرفت علم و تکنولوژی، هم اکنون روش های دیگری جهت تخمین ظرفیت باربری ابداع شده اند. از آن جمله می توان به روش Case-Goble و روش پاسخ دینامیکی حالت پایدار (Steady State Dynamic Response Test) اشاره نمود که هر دو روش بر اساس تئوری پخش موج در محیط بکارگرفته می شوند. همچنین برخلاف آزمون استاتیکی بارگذاری، بسیار سریعتر قابل انجام هستند. با این وجود، انجام چنین آزمایشاتی، نیازمند تجهیزات و وسایل گران قیمت و از همه مهمتر، وجود تجربه و مهارت کافی برای ثبت داده ها و تفسیر آنها می باشد [۱].

با توجه به اینکه دقت استفاده از روابط دینامیکی کوبش شمع، پائین تر از روش آزمایش بارگذاری استاتیکی و تحلیل معادله موج می باشد، اما سادگی استفاده از آن و امکان انجام آن در سخت ترین شرایط باعث شده که مهندسان هموز از آن استفاده کنند. با توجه به اینکه در کشور ما ایران، استفاده از آزمایشات دینامیکی بر پایه تحلیل پخش موج، هنوز، متداول نشده است، به شرح کاربرد روابط دینامیکی و شرایط استفاده از آنها می پردازیم.

## ۲- روابط دینامیکی کوبش شمع (Pile Dynamic Driving Formula)

همانطور که اشاره شد برای شمعهایی که با سیستم ضربه ای کوبیده می شوند، مقدار فرورفت شمع به ازاء هر ضربه، عامل مهمی در برآورد قدرت شمع مورد نظر برای تحمل بار وارد بر آن می باشد. در سیستم شمع کوبی، وزنه چکش با توجه به انرژی که دارد، به سر شمع ضربه وارد می کند که این ضربه باعث فروردن شمع به داخل خاک می شود. رابطه اساسی شمع را می توان به کمک اصل بقا انرژی و یا روابط اصل مومنتوم و ضربه، استخراج کرد [۲ و ۳]. شکل معادله عمومی رابطه اساسی شمع که به رابطه استدلالی شمع نیز شناخته می شود، به صورت زیر است:

$$h_i h_c E_h = \frac{1}{2} P \cdot s_{el} + P \cdot s \quad (1)$$

که در آن :

$h_i$ : ضریب راندمان شمع کوب

$h_c$ : ضریب راندمان ضربه

$E_h$ : انرژی چکش

$P$ : مقاومت کوبش شمع

$s_{el}$ : مجموعه تغییر شکل های ارتجاعی

$s$ : فرورفت شمع در هر ضربه (set)

و ضریب راندمان ضربه برابر است با:

$$h_c = \frac{W_h + n^2 W_p}{W_h + W_p} \quad (2)$$

که در آن:

$W_p$ : وزن شمع

$W_h$ : وزن شمع کوب

$n$ : ضریب بازگشت (Coefficient of Restitution) می باشد.

افراد متعددی نظیر Olson & Faate(1967), Chellis(1961), Gates(1957), Mansur & Hunter(1970), Hiley (1930) با در نظر تمهیداتی خاص و فرضیاتی برای پارامترهای رابطه فوق، بسته به شرایط خاک محل، نوع شمع و شمع کوب، شکل‌های مختلفی را برای رابطه استدلالی شمع ارائه کرده اند، بطوریکه تعداد زیاد این فرمول‌ها باعث شده که برخی از کتاب‌ها فقط به ذکر برخی از آنها بسنده کنند [۳۰ و ۳۱]. می توان این روابط را به دو گروه تقسیم کرد؛ روابطی که تنها از متغیر فرورفت استفاده میکنند (مانند رابطه Gates(1957)) و روابطی که متغیرهای فرورفت و برجهندگی را بکار می گیرند (مانند رابطه Hiley(1930)). گروه دوم جوابهای بهتری را نتیجه می دهند، مخصوصاً هنگامیکه که این دو متغیر با هم به صورت برجا اندازه گیری شوند. در این مقاله نام این روابط را ذکر نمی کنیم و فقط به چگونگی انتخاب پارامترهای رابطه اساسی شمع می پردازیم.

### ۳- متغیرهای روابط دینامیکی کوبش

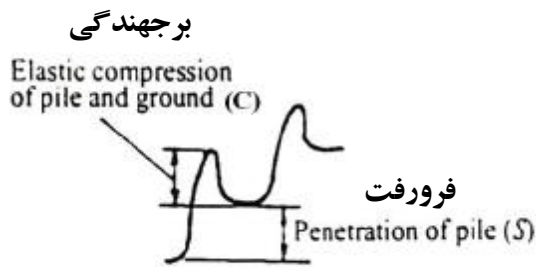
#### ۳-۱- مقدار فرورفت شمع

در علیات شمع کوبی، تعداد ضرباتی که لازم است شمع به مقدار معینی در خاک فرو رود (معمولاً ۲۵ سانتیمتر یا ۵۰ سانتیمتر) شمرده می شود. در نتیجه می توان مقدار فرورفت شمع بازا هر ضربه (set) را بدست آورد. همچنین، با ثبت این داده ها، می توان به نحوه فرورفتن شمع در مواجهه با لایه های مختلف زمین پی برد.

#### ۳-۲- مجموعه تغییر شکل های الاستیک (Set)

مجموعه تغییر شکل های الاستیک شامل سه بخش تغییر شکل الاستیک سر شمع و ملحقات چکش ( $C_c$ )، بدنه شمع ( $C_p$ ) و خاک زیر شمع (Quake) ( $C_q$ ) می باشد. مقدار  $C_c$  را نمی توان مستقیماً اندازه گیری نمود و برای در نظر گرفتن مقدار آن می توان به مراجع مختلف رجوع کرد. همچنین بنا به گفته برخی از منابع معتبر، به دلیل کوچک بودن این متغیر می توان از آن صرف نظر نمود [۳۰ و ۳۱].

تغییر شکل ارتجاعی شمع و خاک زیر شمع نیز، می تواند توسط توصیه های مراجع مختلف با توجه به نوع خاک محل و جنس شمع، تعیین شود. با این حال، روابطی وجود دارند که بر اندازه گیری مقادیر فوق تکیه می کنند. به مجموع این دو تغییر شکل الاستیک، برجهنگی (Rebound) گویند. برای اندازه گیری برجهنگی، تنها کافی است که یک کاغذ روی بدنه شمع نصب شود و حرکات قائم آن توسط یک مداد که به صورت افقی حرکت می کند، ثبت گردد [۴]. باید دقت نمود که تکیه گاه آن حداقل به فاصله ۱/۲ متر و در خارج از محدوده تغییر شکل زمین ناشی از شمع کوبی قرار گرفته باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۱: (الف) عملیات اندازه گیری فرورفت و برجهنگی شمع لوله ای؛ (ب) نمایش مقادیر فرورفت و برجهنگی

شکل ۱ (الف)، یک خرپای فلزی را نشان می دهد که جهت اندازه گیری فرورفت و برجهنگی شمع لوله ای، به شمع کناری متصل شده است. همچنین شکل ۱ (ب)، مقدار فرورفت و برجهنگی ثبت شده به ازاء یک ضربه را نشان می دهد.

لازم به ذکر است در صورتیکه محل اندازه گیری برجهنگی بر روی سر شمع نباشد، بایستی آن مقدار از تغییر شکل الاستیک شمع که بین سر شمع و محل اندازه گیری می باشد را به مقدار برجهنگی ثبت شده اضافه نمود. برای تعیین مقدار فوق با فرض دانستن ظرفیت باربری شمع ( $P$ ) می توان نوشت:

$$d = \frac{P \cdot \Delta l}{EA} \quad (۳)$$

$d$ : تغییر شکل الاستیک باقیمانده شمع

$dl$ : طول باقیمانده شمع (به حساب نیامده در اندازه گیری برجهنگی)

$EA$ : سختی شمع

$P$ : ظرفیت باربری شمع

با صرف نظر کردن از متغیر  $C_c$  داریم:

$$s_{el} = C_p + C_q + \delta = C + \delta$$

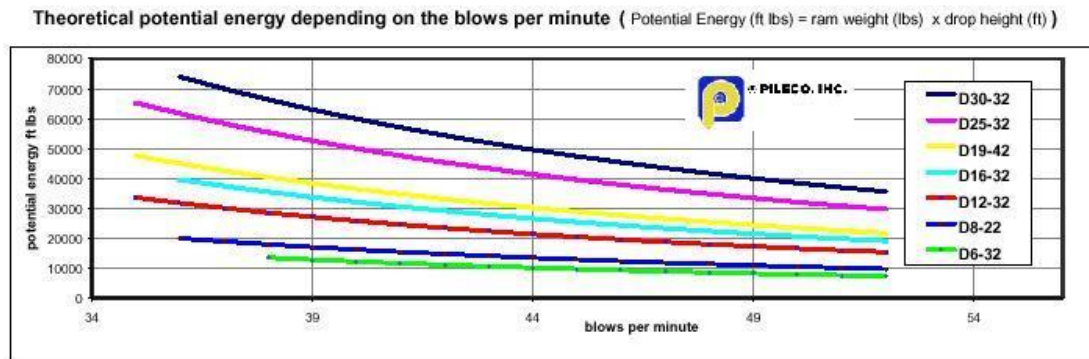
(۴)

با ادغام روابط (۱) و (۳) و (۴) معادله درجه دومی حاصل می شود که جواب آن برابر است با:

$$P = \frac{1}{2} \left( \frac{EA}{\Delta l} \right) \left[ \sqrt{(2s + C)^2 + \frac{8h_i h_c E_h \Delta l}{EA}} - (2s + C) \right] \quad (5)$$

### ۳-۳- انرژی چکش

کارخانه های سازنده چکش، چکش های خود را براساس حداکثر انرژی که ایجاد می کنند طبقه بندی کرده اند (Rated Energy). ولی باید دانست که چکش ها، همیشه با حداکثر انرژی خود کار نمیکنند و بسته به شرایط شمع کوبی نظیر تغییر طول شمع، خصوصیات سندان و غیره می توانند متفاوت باشند [۵]. بنابراین بایستی یا انرژی منتقل شده مستقیماً اندازه گیری شوند (Linkins & Rausche, 1988) و یا اینکه از گرافهایی که توسط شرکت های سازنده منتشر شده و در آن مقدار انرژی تئوریک محاسبه شده چکش بر حسب تعداد ضربه در دقیقه بیان شده است، استفاده نمود. شکل ۳ نمونه ای از این گرافها را نشان می دهد [۷].



شکل ۳: رابطه بین انرژی چکش و سرعت ضربه در واحد زمان در چکشهای دیزل DELMAG

### ۳-۴- ضریب بازگشت (n)

حساسترین متغیر موجود در رابطه دینامیکی شمع، متغیر ضریب بازگشت (n) می باشد. در حقیقت، این ضریب نشانگر نسبت سرعت وزنه قبل از لحظه برخورد به سرعت آن پس از برخورد می باشد. مقدار این متغیر، بستگی به جنس بالشتکی دارد که بین محل برخورد وزنه و سر شمع قرار گرفته است. هرچه قابلیت بازگشت پذیری مصالح بیشتر باشد n بزرگتر است. ولی با گذر عمر بالشتک، مقدار ضریب فوق کاهش می یابد. در نتیجه برای تعیین مقدار مناسب ضریب فوق، تجربه کافی لازم است.

ضریب بازگشت پذیری، علاوه بر تعیین ضریب بازده ضربه ( $\eta_i$ ) (رابطه ۲)، می تواند برای تعیین نوع شمع کوب بر اساس وزن شمع، مورد استفاده قرار گیرد. به عبارتی جهت داشتن یک شمع کوب با راندمان مناسب، لازم است رابطه زیر برقرار باشد [۲]:

$$\frac{W_h + n^2 W_p}{W_h + W_p} \geq 0.45 \quad (6)$$

که در آن:

$W_p$ : وزن شمع

$W_h$ : وزن چکش

$n$ : ضریب بازگشت پذیری

### ۳-۵- وزن شمع

در محاسبه وزن شمع در روابط دینامیکی بایستی چند نکته را رعایت کرد:

- ۱- در صورتیکه پروفیل شمع مورد نظر توخالی باشد و ته آن بسته نباشد، خاک حین کوبش داخل شمع شده و ممکن است که شمع در عمقی از کوبش پلاگ شود (عمقی که شمع پلاگ می شود قابل محاسبه است). در این صورت، خاک درون شمع جزئی از آن شده و در نتیجه در محاسبه وزن شمع بایستی وزن خاک را نیز به حساب آورد. همچنین این پدیده در شمع های با پروفیل HP اتفاق می افتد [۳].
- ۲- در صورتیکه شمع کوبی در محلی انجام می شود که ته شمع در بستر سنگی و یا خاک بسیار متراکم قرار گرفته است، توصیه شده که نصف وزن شمع در محاسبات تخمین ظرفیت باربری وارد شود. (Chellis, 1961)

### ۴- شرایط استفاده از روابط دینامیکی کوبش شمع

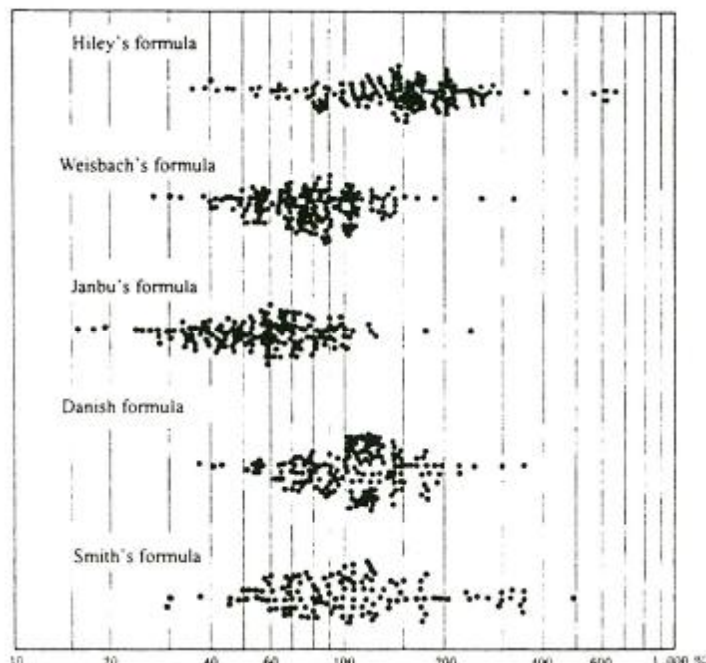
با توجه به نحوه استخراج رابطه استدلالی شمع، می توان گفت که این روابط اکثراً برای شمعهایی کاربرد دارد که به صورت اتکایی عمل می کنند. به عبارتی تجربه نشان داده است که نتایج بدست آمده از شمع کوبی در خاکهای دانه ای، تطابق خوبی با واقعیت داشته است. با این وجود مشاهده شده که برخی از این روابط نتایج خوبی را نیز در شمع کوبی در خاکهای ریزدانه چسبنده سخت و (نه نرم)، ارائه کرده اند. نکته دیگر در استفاده از این روابط این است که باید به فرضیاتی که در استخراج هریک از آنها استفاده شده است، نظیر نوع شمع و چکش، توجه نمود.

همانطور که اشاره شد ظرفیت باربری بدست آمده از روابط کوبش شمع نشان دهنده ظرفیت باربری دینامیکی شمع می باشد که مسلماً با ظرفیت استاتیکی آن متفاوت است. زیرا رفتار شمع به صورت ضربه ای موجب دست خوردگی خاک اطراف می شود در صورتیکه باری که به شمع وارد می گردد، ماهیت استاتیکی دارد. به عنوان مثال، شمع کوبی در یک خاک ماسه ای متراکم باعث افزایش تراکم موضعی خاک اطراف شمع شده ولی پس از گذشت زمان از پایان عملیات شمع کوبی، تنش های ایجاد شده در خاک آزاد شده در نتیجه شمع ظرفیت باربری خود را از دست می دهد. (پدیده وارفتگی Relaxation). در صورتیکه خاک اطراف شمع چسبنده باشد، شمع کوبی باعث دست خوردگی آن شده، ولی پس از گذر زمان خاک اطراف شمع قوت خود را باز می یابد و در نتیجه ظرفیت باربری آن زیاد می شود (پدیده گرفتن خاک set up). از اینرو، توصیه می شود که بسته به نوع خاک محل

(نفوذپذیری و تراکم) پس از گذشت مدتی از عملیات شمع کوبی (چند ساعت در خاک دانه ای و یک روز برای خاک ریزدانه)، عملیات کوبش مجدد (Redriving) انجام گردد و سپس مقادیر فرورفت و برجهنگی اندازه گیری شوند. این مقادیر بایستی با نتایج ثبت شده در مراحل پایانی کوبش اولیه (EOID) مقایسه گردد. اگر بعد از اعمال ۲۰ ضربه بر شمع کاهش مقاومت خاک مشاهده نشود، ظرفیت باربری حاصل شده قابل قبول است؛ در غیر این صورت شمع کوبی تا رسیدن به مقادیر فرورفت و برجهنگی قابل قبول ادامه می یابد [۶]

### ۵- ارزیابی دقت روابط دینامیکی کوبش شمع

همانطور که قبلاً هم اشاره شد روابطی که در آنها علاوه بر متغیر فرورفت، متغیر برجهنگی دخالت دارند، جواب نزدیکتر به واقعیت را نتیجه می دهند. با این حال، پراکندگی در نتایج وجود دارد (شکل ۶). بهترین وسیله برای بررسی دقت این روابط، مقایسه نتایج حاصل شده از روابط فوق با نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی می باشد تا بتوان ضریب اطمینان مناسبی را اختیار نمود. با انجام این کالیبراسیون و تعیین ضریب اطمینان مناسب برای آن، می توان بدون انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی و تنها تکیه بر نتایج روابط دینامیکی، ظرفیت باربری شمعهای با شرایط شمع کوبی یکسان را اندازه گیری نمود.



شکل ۶: نسبت ظرفیت باربری حاصل از روابط کوبش شمع به ظرفیت باربری حاصل از آزمایش

بارگذاری استاتیکی شمع (Sawaguchi, 1970) [۴]

مراجع مختلف، ضرایب اطمینان مختلفی را برای روش های گوناگون ارائه کرده اند. تلاشهای فراوانی در این زمینه انجام شده است که مهمترین آنها تحقیقی بود که در سال ۱۹۶۵م توسط Michigan State Highway Commission انجام گرفت و در آن بهترین ضرایب اطمینان ۱۱ رابطه در مقایسه با بارگذاری

استاتیکی شمع و برای محدوده های مختلف بار طراحی بدست آمد [۳ و ۲]. نتایج این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. محدوده این ضرایب اطمینان بین ۲ تا ۶ می باشد.

SUMMARY OF SAFETY-FACTOR RANGE FOR EQUATIONS USED IN THE MICHIGAN PILE-TEST PROGRAM<sup>a</sup>

| Formula                                  | Upper and Lower Limits of $SF = R_u/R_d^b$ |          |           | Nominal Safety Factor |
|--|--|----------|-----------|-----------------------|
|  | Range of $R_u$ , kips:                     |          |           |                       |
|  | 0-200                                      | 200-400  | 400-700   |                       |
| Engineering News                         | 1.1-2.4                                    | 0.9- 2.1 | 1.2- 2.7  | 6                     |
| Hiley                                    | 1.1-4.2                                    | 3.0- 6.5 | 4.0- 9.6  | 3                     |
| Pacific Coast                            | 2.7-5.3                                    | 4.3- 9.7 | 8.8-16.5  | 4                     |
| Uniform Building Code                    |  |          |           |                       |
| Redtenbacher                             | 1.7-3.6                                    | 2.8- 6.5 | 6.0-10.9  | 3                     |
| Eytelwein                                | 1.0-2.4                                    | 1.0- 3.8 | 2.2- 4.1  | 6                     |
| Navy-McKay                               | 0.8-3.0                                    | 0.2- 2.5 | 0.2- 3.0  | 6                     |
| Rankine                                  | 0.9-1.7                                    | 1.3- 2.7 | 2.3- 5.1  | 3                     |
| Canadian National Building Code Modified | 3.2-6.0                                    | 5.1-11.1 | 10.1-19.9 | 3                     |
| Engineering News                         |  |          |           |                       |
| Gates                                    | 1.8-3.0                                    | 2.5- 4.6 | 3.8- 7.3  | 3                     |
| Rabe                                     | 1.0-4.8                                    | 2.4- 7.0 | 3.2- 8.0  | 2                     |

<sup>a</sup> After Housel (1966).

<sup>b</sup>  $R_u$  = ultimate test load  
 $R_d$  = design capacity, using the nominal safety factor recommended for the equation

جدول ۱: ضرایب اطمینان روابط دینامیکی مختلف

با توجه به محدوده بار طراحی

کالیبراسیون عمومی برای شرایط و مناطق مختلف انجام گردد

## ۶- خلاصه و نتیجه گیری

۱- دقت روابط دینامیکی کوبش کمتر از روشهای دیگر است.

۲- استفاده از روابط دینامیکی فوق را به دلیل سادگی نمی توان حذف کرد.

۳- روابط دینامیکی کوبش با اندازه گیری برجهنگی، دقت بیشتری دارند.

۴- در این مقاله، به چگونگی انتخاب متغیرهای مورد نیاز روابط دینامیکی پرداخته شد.

۵- برای استفاده از روابط دینامیکی لازم است

## ۷- تشکر و قدردانی

در پایان بر خود لازم می دانم از مساعدتهای همکاران موسسه مشاورین ساحل بخصوص آقایان طباطبایی و رجحانی و همچنین از آقای دکتر علی فاخر تشکر و قدردانی نمایم.

## ۸- مراجع

- [1] Holeyman, A. (1997), "Pile dynamic testing, driving formula, monitoring and quality control: Background for discussion", "Design of Axially Loaded Piles, European Practice", Cock & Legrand (eds)
- [2] Poulos, H.G., Davis, E. H. (1980), "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley & Sons, New York, 397p.
- [3] Bowles, J.E. (1996), "Foundation Analysis and Design", 5th edition, McGraw Hill, 1175p.
- [4] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (2002), Technical Standards and Commentaries for Port Harbour Facilities in Japan, 600p.
- [5] Fang, H. Y. (1991), "Foundation Engineering Handbook", 2nd edition, Chapman & Hall, New York, 658p.
- [6] Tomlinson, M.J. (1987), "Pile Design and Construction Practice", 3<sup>rd</sup> Ed., Viewpoint Publications, London, England, 378p.
- [7] Pile Co. Inc. (2004), "Delmag Specification Diesel Hammers", <http://www.pileco.com>