

بررسی و طبقه بندی روشهای مختلف آزمونهای دینامیکی شمع

دکتر عبدالحسین حداد

عضو هیئت علمی دانشگاه سمنان a-haddad@irost.net

دکتر غلامعلی شفافبخش

عضو هیئت علمی دانشگاه سمنان gh-shafabakhsh@irost.net

چکیده

بکارگیری آزمونهای دینامیکی شمع بعنوان روشی سریع و اقتصادی در امر کنترل کیفیت شمع ها رفته رفته در بسیاری از پروژه های عمرانی رایج می شود و هر روزه بر تنوع آنها افزوده می گردد. آزمایشهای دینامیکی شمع بعنوان ابزاری مطمئن در اختیار مهندسين است تا آنها را از صحت محاسبات طراحی و ساخت و اجرای مناسب شمع ها در مرحله نصب مطمئن سازد. بی شک بدلیل وضعیت خاص قرارگیری سیستم شالوده های عمیق در هر سازه و احاطه شدن آنها توسط خاک و نقش آنها در حفظ پایداری سازه ها کنترل کیفیت اجرای شمع ها از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله سعی شده است ضمن معرفی روشهای مختلف آزمایش دینامیکی شمع، آزمونها از نظر فنی طبقه بندی شده و موارد مصرف هر آزمون به همراه نقاط ضعف و قوت آن ذکر گردد.

کلمات کلیدی: شمع - آزمایشهای دینامیکی شمع - ظرفیت باربری شمع - سلامت شمع - شمع کوبی

مقدمه

هرگونه نقص در طراحی، ضعف در ساخت شمع و نادرستی در روش اجرا موجب وارد آمدن خسارات هنگفتی به سرمایه های ملی کشور گشته که جبران آن هزینه ای گزاف را بر کارفرمایان تحمیل می نماید. بدین دلیل بنظر می رسد تدوین مستندات لازم در این باره که حاوی نکات ارزنده راجع به روشهای طراحی، ساخت و اجرای شالوده های عمیق و بخصوص شمع ها باشد می بایست از سوی متولیان امور فنی و زیر بنایی کشور و بخصوص سازمان مدیریت و برنامه ریزی مورد توجه قرار گیرد. در هر سال در کشور ما میلیاردها ریال بابت طراحی، ساخت و اجرای شمع ها در پروژه های مختلف عمومی و خصوصی هزینه می شود. اما نکته مهم اینجاست که مجریان، ناظران و پیمانکاران چگونه می توانند از صحت اجرای این سازه های ژئوتکنیکی مطمئن گردند. روشهای سنتی آزمایش شمع که شامل آزمایش مصالح بکار رفته در ساخت شمع و بارگذاری استاتیکی بر روی شمع ها می باشد آنقدر پر هزینه و وقت گیر است که کمتر مجری و پیمانکاری به اجرای آن مبادرت می ورزد. از طرفی فاصله فناوری حاصله در این رابطه میان کشورهای توسعه یافته و کشور ما متأسفانه روز به روز بیشتر می شود و فرصت جبران عقب ماندگیها در این زمینه کمتر.

ضرورت استاندارد کردن آزمونها

اگرچه استاندارد کردن روشهای آزمایشهای دینامیکی بر روی شمعها و تهیه کدهای اجرایی مخصوص آنها از پانزده سال قبل آغاز شده است اما استفاده از این آزمایشها جهت کنترل کیفیت شمعها در برخی از کشورها عمری نزدیک به ۳۰ سال دارد. از این رو به نظر می رسد، زمان آن فرا رسیده که با توجه به رشد و تکامل طی شده در این زمینه، کشورهای مختلف نسبت به تامین الزامات و کدهای مربوط

به طراحی و بازرسی شمعها اقدام نمایند. البته آشکار است که تکامل این متدها هنوز ادامه دارد و نباید انتظار داشت که استاندارد کردن این نوع آزمونها به معنای توقف پیشرفت در ابداع و نوآوریهای آینده باشد.

در حال حاضر در بسیاری از کشورها آزمونهای دینامیکی انجام می شوند بدون آنکه استاندارد خاصی برای انجام آزمایش در آن کشور تهیه شده باشد. همچنین در برخی کشورها استفاده از آزمونهای دینامیکی شمع در آئین نامه ها یا کدهای طراحی سازه ها توصیه شده اند بدون آنکه قبلا دستورالعمل استاندارد انجام این آزمایش تدوین شده باشد.

در اینجا منظور از استاندارد مستنداتی است که حداقل الزامات مربوط به تجهیزات مورد نیاز به همراه روش صحیح انجام آزمایش و محاسبات مربوطه را مشخص می سازد. از سوی دیگر مراد از کد یا آئین نامه دستورالعملی کلی است که طی آن مراحل مطالعات، طراحی و اجرای یک پروژه خاص مشخص میشود. بنابراین معمولاً در کدها یا آئین نامه به آزمایشها یا روشهای خاصی ارجاع می شود که آن آزمایشها یا روشها می بایست قبلاً تحت استاندارد مشخصی ارائه و شناخته شده باشند.

آزمونهای دینامیکی شمع عموماً در پاسخ به دو سوال اصلی زیر انجام میگردند:

الف - اطمینان از سلامت و یکپارچگی شمع ها از طریق (Pile Integrity Test). شمع ها بعنوان بخشی از سیستم شالوده های عمیق می بایست پیوسته و بدون ترک باشند. هرگونه نقص در سطح مقطع و یا گسستگی در بدنه شمع که در طول مراحل ساخت و یا نصب ممکن است ایجاد گردد بر قابلیت باربری شمع تاثیر گذاشته و از ظرفیت اسمی شمع می کاهد.

ب- کنترل ظرفیت باربری نهایی شمع از طریق (Dynamic Pile Load Test). لازم است پس از نصب و یا اجرای شمع ها در محل خود، ظرفیت باربری نهایی آنها با توجه به شرایط ژئوتکنیکی محیط مورد بررسی قرارگیرد. بدیهی است چنانچه به هر علتی شمع ها قادر به تحمل و انتقال بار سازه به محیط اطراف خود نباشند، باربری کل سیستم شالوده کاهش یافته و سازه با خطرناک شدن و یا گسیختگی مواجه خواهد شد.

با توجه به موارد کاربرد ذکر شده در جدول (۱) برخی از کدهای معتبر مربوط به آزمون های دینامیکی شمع بر حسب کشور های مختلف ارائه دهنده استاندارد معرفی شده است.

جدول (۱) - فهرست استانداردهای اصلی آزمون های دینامیکی شمع

نام کشور	مرجع استاندارد	عنوان
استرالیا	Australian Standard , AS – 2159-1995	Piling-Design and Installation
برزیل	NBR-6122	Design and execution of foundations
برزیل	NBR –13208	Dynamic testing of piles
چین	JGJ 94-94	Technical code for building pile foundation chapter 9- Inspection and Acceptance of pile foundation engineering –9.2
چین	JGJ 106-97	Specification for High Strain Dynamic Testing of Piles (HST)
آلمان	Dynamic Pile Load Test- Draft Sept. 1997	Recommendations by the committee 2.1 of the DGGT for the impact testing of piles
کانادا	Ontario Highway Bridge Design Code, 3rd Edition	Government of Ontario, Ministry of Transportation
فرانسه	NFP 94-1602, NFP 94-160-4	Investigation and testing Ascultation of buried work method by reflection/impedance
فرانسه	NFP 94-160-1	As above ... Sonic core test
انگلستان	Institution of Civil Engineers, Specification of Piling	Chap. 11 : Indirect Method of test for Testing Piles, 11.2 Dynamic Pile testing
آمریکا	ASTM D 4945-89 , ASTM D 5882	Standard Method of test for High Strain Dynamic testing of piles and Low Strain integrity testing of piles
آمریکا	AASHTO LRDF, 1994	Bridge Design Specifications, AASHTO

آزمایشهای متداول دینامیکی شمع را برحسب نحوه انجام آنها می توان به دودسته کلی زیر تقسیم کرد

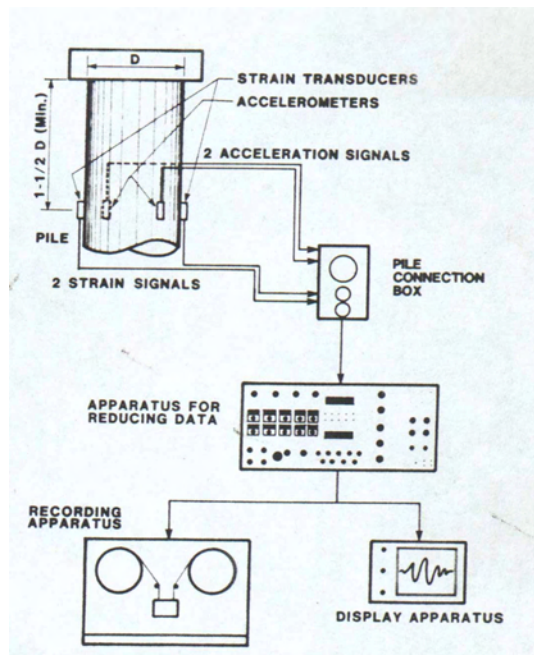
۱- آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی زیاد یا (High Strain Dynamic Test) ، که عمدتاً جهت برآورد ظرفیت باربری شمع مورد استفاده قرار می گیرد.

۲- آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی کم یا (Low Strain Dynamic Test) . این آزمون جهت تشخیص سلامت و یکپارچگی شمع مورد استفاده قرار می گیرد.

بطور مشترک در این آزمونها یک موج تنشی یا صوتی ناشی از ضربه ویا منبع موج، بداخل شمع هدایت میگردد. سپس در همان نقطه و یا نقطه ای دیگر درطول شمع به ثبت امواج منعکس شده می پردازند.در مرحله بعدبا پردازش امواج منعکس شده می توان به اهداف ذکر شده در بالا یعنی تعیین ظرفیت باربری و یا کنترل سلامت شمع پرداخت.گفتنی است طبقه بندی آزمونها بر حسب تغییر شکل نسبی ایجاد شده در شمع کاملاً قراردادی و به مقدار دامنه تغییر شکل نسبی ایجاد شده در شمع بستگی دارد. در ادامه بحث هریک از روشهای ذکر شده مورد بررسی قرار می گیرند.

آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی زیاد (HST)

آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی زیاد در دهه ۱۹۶۰ و توسط موسسه تکنولوژی CASE در آمریکا ابداع شد، (Goble-1970). اگرچه کاربرد اصلی این آزمایش به منظور تعیین ظرفیت باربری شمع هاست. اما می توان از این طریق سلامت شمع ها را نیز مورد بررسی قرار داد. در بیشتر روشهای آزمون شمع با دامنه تغییر شکل زیاد (HST) وزنه ای نسبتاً سنگین به روی شمع رها می شود، و سپس از طریق ابزار نصب شده بر روی سر شمع یعنی یک جفت شتاب نگار و یک جفت کرنش سنج، سرعت ذره ای و نیروی ناشی از این ضربه در محدوده زمانی حرکت موج تنشی در طول شمع ثبت می گردد. شکل شماتیک (۱) تجهیزات لازم در این آزمایش را نشان میدهد.



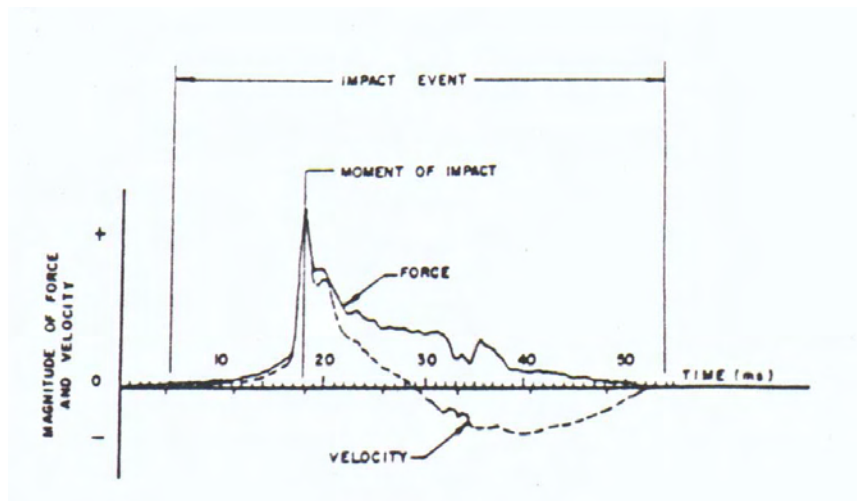
شکل (۱) : تجهیزات لازم جهت انجام آزمایش دینامیکی شمع با تغییر شکل نسبی زیاد مطابق روش ASTM D4945

با در اختیار داشتن دیاگرام تغییرات نیروی وارد بر شمع (به کمک حاصل ضرب مقدار کرنش ثبت شده در شمع در مدول یانگ و سطح مقطع شمع)، رابطه (۱) و مقایسه آن با نیروی بدست آمده از حاصل ضرب سرعت ذره ای در ایمپدانس شمع، رابطه (۲) می توان قابلیت باربری دینامیکی شمع را تخمین زد.

$$F = \varepsilon \cdot E \cdot A \quad (1)$$

$$F = Z \cdot V = \rho \cdot C \cdot A \cdot V = \frac{A \cdot E}{C} \cdot V \quad (2)$$

در روابط ذکر شده در بالا Z ایمپدانس شمع، V سرعت ذره ای موج حاصل از ضربه در شمع، E مدول یانگ و A سطح مقطع و C سرعت گسترش موج تنشی در شمع می باشد. در شکل (۱) نمونه ای از دیاگرام تغییرات سرعت و نیرو در آزمایش تعیین ظرفیت باربری دینامیکی شمع نمایش داده شده است. شکل (۲) نمونه ای از دیاگرام تغییرات سرعت و نیرو در این آزمایش را نشان می دهد.



شکل (۲): نمونه تیپ دیاگرام تغییرات نیرو و سرعت بر حسب زمان،
ثبت شده در یک آزمایش دینامیکی شمع (HST)

این آزمایش را می توان در حین شمع کوبی مورد استفاده قرار داد. از این رو روشی است نسبتاً مناسب جهت برآورد ظرفیت باربری شمع در حین راندن آن در داخل خاک. از طریق این آزمایش می توان ظرفیت باربری نوک و جدار شمع را به تفکیک نیز تخمین زد. در جدول (۲) برخی مشخصات فنی مربوط به این آزمایش ذکر شده است.

جدول (۲): برخی مشخصات فنی آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی زیاد (HST)

2000-1000 Kg	محدوده جرم چکش در آزمایش
500-1000 str	حداکثر کرنش ایجاد شده در شمع
2000-4000 mm/sec	حداکثر سرعت ذره ای ایجاد شده در شمع در محل ضربه
2000-10000 KN	حداکثر نیروی وارده بر شمع
50-20 ms	زمان تداوم نیروی وارد بر شمع
500 g	شتاب ایجاد شده در شمع
10-30 mm	محدوده جابجایی شمع

لازم است مقدار ضربه وارد بر شمع جهت این نوع آزمایش از مقدار ظرفیت دینامیکی سازه ای شمع کمتر باشد. چرا که با اعمال ضربه خیلی قوی بدنه شمع دچار شکستگی شده و آسیب می بیند. همچنین بدلیل تاثیر مقاومت خاک بر ضربه اعمالی لازم است مقدار نیروی حاصل از ضربه وارده به شمع، بیشتر از نصف مقاومت خاک باشد. علت این امر نیز آن است که ضربه خیلی ضعیف اصولاً موجب پدید آمدن مقاومت خاک در اطراف شمع نخواهد شد. طبق تجربیاتی که شمع کوبان از اجرای پروژه های مختلف کسب کرده اند جهت راندن شمع به مقدار هر چه بیشتر در خاک با یک سطح انرژی مشخص، بهتر است تا حد امکان از چکشهای سنگین تر همراه با ضربه گیرهای نرم تر که در سر شمع قرار می گیرند استفاده نمود. استفاده از این ضربه گیرها مانع از آسیب دیدن شمع ها در حین کوبیدن می شود. در جدول (۳) سطوح انرژی مورد نیاز برای رانش شمع های مختلف در خاک ارائه شده است (Holeyman -1992).

از محدودیت های این نوع آزمون می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

الف- مشکل تبدیل ظرفیت باربری دینامیکی شمع به ظرفیت باربری استاتیکی ناشی از تاثیر میرایی تشعشی و اینرسی شمع بر نتایج حاصله (Haddad-1998).

ب- تفاوت الگوی تغییر شکل شمع در بدنه و نوک شمع و تاثیر آن بر نتایج ثبت شده.

ج- تاثیر فشارمنفذی ایجاد شده در اطراف شمع و اثر آن بر مشخصات خاک و بر ظرفیت باربری شمع

د- وابستگی پارامترهای دینامیکی و مقاومت برشی خاک به سرعت انتشار امواج در محیط.

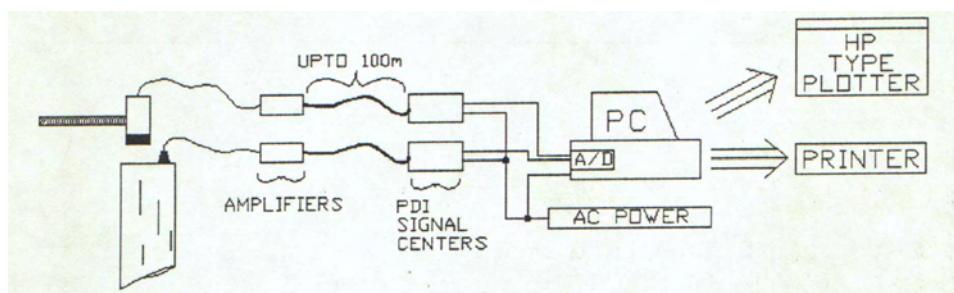
جدول (۳): سطوح انرژی مورد نیاز در آزمایش های دینامیکی شمع با تغییر شکل نسبی زیاد (HST)

شمع بتنی در جا با قطر 1m	شمع با مقطع لوله با قطر 406 mm و انتهای بسته	شمع بتنی پیش ساخته به ابعاد 30 × 30 cm	شمع فولادی با مقطع H و ابعاد 73 × 14"	شمع چوبی با قطر 30 cm	نوع شمع
4	2	1	1.5	0.4	بار وارده بر شمع در شرایط کاری (MN)
7.8	0.8	0.9	0.56	3	ایمپدانس شمع (MN/ms-1)
25	10.2	8.5	4	7.5	جابجایی مورد نیاز در شمع (۲/۵ در صد قطر شمع)
195000	8200	7600	2250	2250	اندازه حرکت مورد نیاز جهت دستیابی به جابجایی ۲/۵ در صدی قطر شمع (kg) × (ms-1)
77000	3240	3000	900	900	مقدار جرم در ارتفاع مورد نیاز (kg) × (m)

آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی کم (LST)

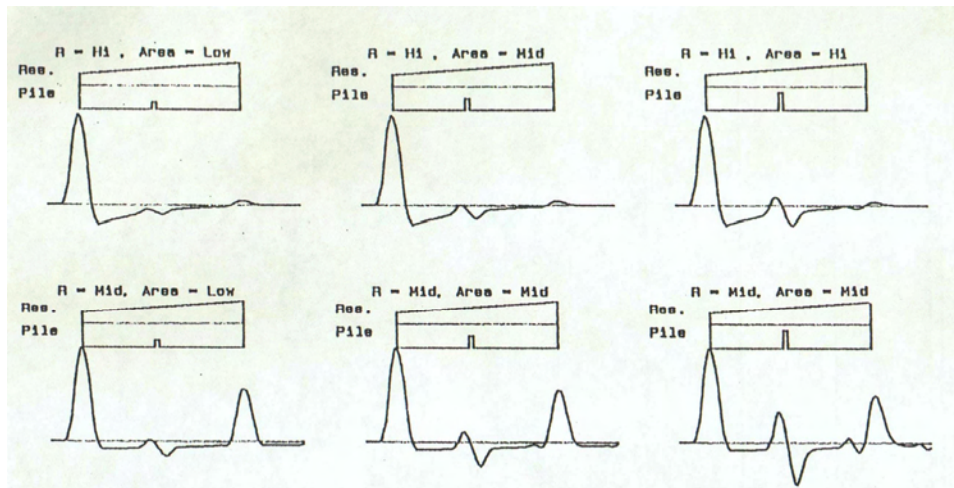
در رایج ترین نوع آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی کم مطابق با استاندارد (ASTM D5882-96) ضربه ای توسط چکش دستی به سر شمع وارد می شود و پاسخ شمع به این ضربه به صورت سرعت و یاسرعت و شتاب بطور همزمان در محل سر شمع ثبت می گردد.

این روش آزمایش به نام متد پالس اکو (Pulse Echo) یا اختصاراً (PEM) نیز شناخته می شود. در نوع خاصی از این آزمون از چکش ویژه ای استفاده می شود که بر روی آن ابزار لازم جهت اندازه گیری نیروی وارد بر شمع نیز نصب شده است. این روش آزمایش به نام متد پاسخ گذرا یا (Transient Response Method) یا اختصاراً (TRM) نیز نامگذاری شده است. مهمترین هدف از انجام آزمون دینامیکی (LST) برآورد یکپارچگی و یا سلامت شمع بعنوان یک عضو سازه ای می باشد. به همین دلیل این روش بنام (Pile Integrity) و یا اختصاراً (PIT) نیز شناخته می شود. در شکل (۳) تجهیزات مورد نیاز آزمایش بصورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۳): نمایش شماتیک تجهیزات مورد نیاز آزمایش دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی کم

شایان ذکر است در روش (PEM) تغییرات سرعت ذره ای در سر شمع بر حسب زمان ترسیم می شود و به کمک آن می توان عیوب سازه ای شمع مثل ترک، حفره و یا تغییر سطح مقطع را تشخیص داد. در شکل (۴) نمونه هایی از پاسخ چند شمع در این آزمایش به همراه شکل ظاهری بدنه شمع حاصل از تحلیل امواج برگشتی ثبت شده نشان داده شده است.



شکل (۴): نمونه هایی از پاسخ چند شمع معیوب در آزمایش دینامیکی بادامنه تغییر شکل نسبی کم

در روش آزمایش (TRM) سرعت و یا نیرو اندازه گیری شده در سر شمع به حوزه فرکانس تبدیل می شوند و سپس موبیلیتی شمع که نسبت سرعت به نیرو است تعیین میگردد. از آنجاییکه موبیلیتی شمع تابعی از سطح مقطع و خواص فیزیکی شمع مثل مدول یانگ می باشد بنابراین با در اختیار داشتن تغییرات موبیلیتی در طول شمع می توان به تصویری تقریبی از مقطع هندسی شمع به همراه خواص فیزیکی آن دست یافت.

به کمک این آزمون می توان عیوب زیردر شمع ها را مشخص کرد.

- عدم یکنواختی و کیفیت پایین مصالح بکاررفته در شمع به صورت موضعی و یا کلی.
- وجود تغییرات در سطح مقطع شمع بعلت ترک، حفره یا انبساط و انقباض مقطع شمع بدلیل ریزش جانبی در خاک اطراف جدار شمع.

این آزمایش در کشور فرانسه توسط مؤسسه CEPTB و در کشور هلند توسط مؤسسه TNO و در آمریکا توسط شرکت PDA بنام (PIT) بشکل تجاری آن عرضه و مورد استفاده قرار می گیرد. بخشی از مشخصات فنی آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی کم (LST) در جدول شماره (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): برخی مشخصات فنی آزمون دینامیکی شمع با دامنه تغییر شکل نسبی کم (LST)

0.5- 5Kg	جرم چکش
2- 10 □str	حداکثر کرنش ایجاد شده در شمع
10- 40 mm/sec	حداکثر سرعت ذره ای ایجاد شده در شمع
2- 20 KN	حداکثر نیرو
0.5- 2ms	زمان تداوم نیرو
50 g	شتاب ایجاد شده در سر شمع
0.01 mm	جابجایی شمع

برخی از مشکلات مرتبط انجام این آزمایش که بر دقت نتایج تاثیر می گذارد عبارتند از:

- اثر ارتعاشات مزاحم و جعلی در محیط اطراف شمع و دشواری مجزا کردن این ارتعاشات از موج ناشی از ضربه چکش
- تاثیر مقاومت جانبی خاک بر ایمپدانس اندازه گیری شده بدنه شمع و در نتیجه بروز خطا در تعیین مقطع شمع.
- دشواری تشخیص تغییرات موجود در مقطع اگر این تغییرات جزئی و یا تدریجی باشد.
- قابلیت تکرار پذیری آزمایش با توجه به موارد انتشار شده در بالا کم و محدود است .

نتیجه گیری

در این مقاله ضمن اشاره به نیاز جامعه فنی به تدوین دستورالعملها و استانداردهای متناسب جهت کنترل کیفیت شالوده های عمیق برخی از کد های معتبر در این رابطه معرفی گشت. سپس آزمون های دینامیکی در زمینه کنترل باربری و سلامت شالوده های عمیق یا شمع به دویخش آزمون با دامنه تغییر شکل نسبی کم و زیاد تقسیم و مشخصات فنی هر آزمون بصورت کلی بیان گردید. همچنین در هریخش اصول کلی آزمایش به همراه نتایج حاصله و نقاط ضعف و قوت آن روش مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است آزمونهای کنترل کیفیت شمع و تعیین ظرفیت باربری آنها محدود به موارد ذکر شده در این مقاله نمی باشد و علاقمندان در این زمینه میتوانند به مقالات مرتبط و از جمله مقاله (A.E.Holeyman -1992) مراجعه نمایند. بنظر می رسد با توجه به رشد پروژه های عمرانی در سطح کشور و ضرورت بکارگیری روشهای نوین در امر کنترل کیفیت ، دیر یا زود مهندسين دست اندرکار امور اجرایی و نظارت دریخش زیر سازه پروژه ها می بایست با این روشها آشنا گشته و از فناوری روز جهان در این زمینه استفاده نمایند.

مراجع

- 1- ASTM D4945-97. Standard Test Method for High- Strain Dynamic Testing of Piles. American Society for Testing and Materials, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.
- 2- ASTM D5882-96. Standard Test Method for Low- Strain Integrity Testing of Piles. American Society for Testing and Materials, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.
- 3- Australian Standard@ AS2159-1995. Piling-Design and Installation. Published by Standards Australia (Standards Association of Australia), I The Crescent, Homebush, NSW 2140, ISBN 0 7262 9884 0.
- 4- Beim, J. Standardization and codification of dynamic pile testing - a worldwide review - DFI 98 Conference
- 5- German Society for Geotechniques E.V. Dynamic Pile Load Tests - Draft of September 1997.
- 6- German Society for Geotechniques E.V. Dynamic Pile Integrity Tests - Draft of September 1997.
- 7- Goble, G.G. and Rausche, F., 1970. Pile Load Test by Impact Testing. Highway Research Record No. 333. Washington, D.C., 1970
- 8- Haddad. A.,1998. Pile driving analysis using the stress-wave theory and a modified soil modelling based on the elasto-dynamic theory, Ph.D. Thesis, Shiraz University, Iran
- 9- Holeyman. A.E, (1992) - Technology of pile dynamic testing , Application of Stress-Wave Theory to Piles , p.p.195-215 –