



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی  
**ICOPMAS 2010**  
 10-8 آذر ماه (تهران)



## کاربرد آزمایش کنترل یکپارچگی شمع (PIT) در تخمین طول شمع های اسکله های 10 و 14 پست بندر امام خمینی

کاظم فخاریان، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، [kfakhari@aut.ac.ir](mailto:kfakhari@aut.ac.ir)، ایمان حسین زاده عطار، دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، [ih\\_attar@yahoo.com](mailto:ih_attar@yahoo.com)

کلید واژه: آزمایش کنترل یکپارچگی شمع، PIT، اسکله، برآورد طول شمع، بندر امام خمینی، شمع سانتریفیوژ

**چکیده:** آزمایش کنترل یکپارچگی شمع (PIT) بر روی بیش از 30 مورد از شمع های اجرا شده قدیمی اسکله های 10 و 14 پست در بندر امام خمینی به منظور برآورد طول آنها انجام شده است. اسکله های 10 و 14 پست در مجاورت هم و به طول تقریبی 5000 متر و پهنای 55 متر در اواسط دهه 70 میلادی احداث شده اند. شمع های اجرا شده از نوع بتنی پیش تنیده کوبشی، تولید شده به روش سانتریفیوژ و به قطر 800 میلیمتر است. هدف اصلی از انجام آزمایش های PIT برآورد طول شمع های اجرا شده، به ویژه در ردیف های نزدیکتر به سمت پهلوگیری کشتی، به منظور ارزیابی گسترش ظرفیت اسکله های 10 و 14 پست بندر امام خمینی بوده است. قبل از انجام عملیات این نگرانی وجود داشت که با توجه به نسبت بالای طول به قطر شمع ها که در محدوده 30 تا 50 برآورد می شد، اخذ نتیجه مطلوب امکان پذیر نباشد. اما علیرغم مشکل فوق و همچنین مشکل دسترسی مستقیم به راس شمع ها، نتایج رضایت بخشی بدست آمد. علل اصلی در موفقیت نتایج، یکپارچه بودن شمع ها و عدم وجود اتصال، کیفیت بالا و همگنی بتن شمع ها و توخالی بودن آنها را می توان برشمرد. طول شمع ها در محدوده 25 الی 40 متر و میانگین 33 متر حاصل شد که برای اهداف افزایش ظرفیت اسکله مناسب بود.

### 1- مقدمه

همانند سایر سازه ها، مقاوم سازی و یا ارتقاء ظرفیت بهره برداری اسکله های قدیمی در بنادر مختلف کشور از جمله برنامه های عمرانی بیش از یک دهه گذشته بوده و همچنان تداوم دارد. با توجه به قدمت حداقل 30 الی 40 ساله این اسکله ها، اطلاعات و نقشه های "چون ساخت" (As-Built) آن ها معمولاً در دسترس نیست. لذا در برداشت و ارزیابی وضعیت موجود اسکله، از جمله اطلاعات مهم و کلیدی طول شمع های اجرا شده در نقاط مختلف اسکله است. طول کل شمع یک اسکله معمولاً در سه بخش بالای سطح آب، بین تراز سطح آب تا شروع زمین و بخش مدفون در خاک است. مشکل اصلی در تعیین طول کل شمع، کسب اطلاعات از بخش مدفون شمع در خاک می باشد. آزمایش های غیرمخرب موسوم به "آزمایش دینامیک شمع" در این راستا راهگشا هستند.

آزمایش های دینامیکی شمع به دو نوع "آزمایش های کرنش بالا" و "آزمایش های کرنش پایین" تقسیم می شوند. آزمایش دینامیکی کرنش بالا که به آزمایش PDA (Pile Driving Analyzer) موسوم است در حین کوبش شمع های پیش ساخته با چکش شمع کوب و یا با اعمال ضربه چکش شمع کوب بر روی شمع های اجرا شده به منظور کنترل ظرفیت باربری، تنش های ایجاد شده در شمع در حین کوبش، راندمان چکش شمع کوب و همچنین ارزیابی کنترل کیفیت و آسیب های احتمالی شمع انجام می شود. برای این منظور حس گرهای مختلفی در نزدیکی رأس شمع نصب می گردد که اطلاعات حاصل از ضربه چکش را به سیستم ضبط اطلاعات یا دستگاه PDA منتقل می نماید. اما در آزمایش های کرنش پایین ضربه تنها توسط یک چکش دستی مخصوص به رأس شمع وارد شده و موج کرنشی حاصله از طریق یک حسگر شتاب نگاشت به سیستم ثبت اطلاعات منتقل می گردد. با پردازش و تحلیل موج حاصل از ضربات چکش می توان وضعیت یکپارچگی پروفیل طول شمع را از لحاظ هندسی و کیفیت مصالح ارزیابی نمود. از طرف دیگر، چنانچه نوع مصالح شمع معلوم باشد (مثلاً بتن یا فولاد) می توان با اندازه گیری دقیق زمان رفت و برگشت موج کرنشی پس از اعمال ضربه، نسبت به طول شمع قضاوت نمود. برای اطلاعات مبسوط تر راجع به تست های دینامیک شمع می توان به فخاریان و فیضی (1386) مراجعه نمود.

آزمایش‌های غیر مخرب در فونداسیون‌های شمع‌ی جهت ارزیابی پیوستگی فیزیکی آنها از حدود دهه 80 میلادی به ویژه در آمریکا و شمالی صورت عادی انجام می‌شود (Cunha, 2008). در این میان تعیین طول پی‌های عمیق از اهمیت خاصی برخوردار است. روش‌های متعددی برای تعیین طول شمع‌ها وجود دارد. انتخاب روش و برنامه آزمایش بستگی به اطلاعات مورد نیاز، نوع فونداسیون، نوع خاک و شرایط دسترسی به فونداسیون دارد (Sack et al., 2008).

به هر دلیلی که نیاز به مشخصات فونداسیون داشته باشیم، واضح است که قابلیت اطمینان، سرعت و هزینه روش آزمایش مهم خواهد بود. روش‌های متعددی جهت ارزیابی فونداسیون‌های نامشخص وجود دارد. این روش‌ها یا بر پایه انتشار موج کرنش (تنش) استوارند (مانند روش کرنش پایین) و یا روش‌های مافوق صوت می‌باشند. از جمله روش‌هایی که بر پایه موج تنش استوارند می‌توان از روش‌های Surface Sonic Echo (SE)، Impulse Response (IR) و Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) نام برد. روش Parallel Seismic (PS) را می‌توان از جمله روش‌های مافوق صوت برای فونداسیون‌های نامشخص دانست. دیگر روش‌های مافوق صوت مانند روش Cross-hole Sonic Logging (CSL) و یا Single-hole Sonic Logging (SSL) با برنامه‌ریزی قبلی و قرار دادن یک لوله از جنس PVC یا فولادی در شمع انجام می‌شود.

برای مواردی که به یک ارزیابی سریع و ارزان از فونداسیون نیاز داریم روش‌های کرنش پایین مطلوب می‌باشند. محدودیت این روش‌ها احتیاج به دسترسی به قسمت‌های بالایی فونداسیون (یا بطور ایده‌آل سر شمع) بوده و نیز این روش‌ها برای شمع‌های خیلی بلند و لاغر مناسب نیستند. در مورد نسبت طول به قطر شمع‌هایی که می‌توان با این روش آزمایش کرد اطلاعات متفاوتی در دسترس است. بطور مثال Rausche and Likins (1993) نسبت طول به قطر را برای خاک‌هایی با مقاومت نسبتاً بالا حدود 30 پیشنهاد کرده‌اند. در چین آیین نامه JGJ 106-2003 که یک کد برای آزمایش فونداسیون‌های شمع‌ی ساختمان‌ها است، این نسبت را بین 30 تا 50 پیشنهاد می‌کند. البته واضح است در هر مورد نتایج آزمایش‌های انجام شده و بررسی سیگنال‌های بدست آمده نشان می‌دهد که آیا روش قابل استفاده خواهد بود یا سیگنال مشخصی از نوک شمع بدست نمی‌آید. در عین حال آزمایش PIT بنا به اظهار محققین ابزاری مناسب برای کنترل طول و کیفیت جدار شمع است (White et al., 2008). همچنین مقالات مختلفی تاکنون برای تعیین طول شمع با این روش منتشر شده است که از جمله می‌توان به Morgano (1996) و Massoudi and Teferra (2004) اشاره نمود.

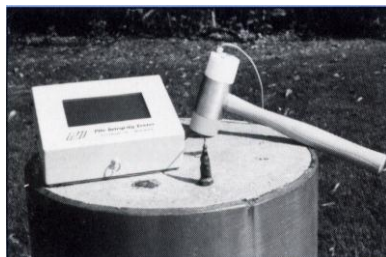
در این مقاله بکارگیری روش PIT در تعیین طول شمع‌های اسکله‌های 10 و 14 پست بندر امام خمینی پرداخته شده است. شمع‌های این اسکله‌ها از نوع سانتریفیوژ و با قطر خارجی 800 میلیمتر است که در اواسط دهه 70 میلادی اجرا شده‌اند. تعداد 30 شمع از مجموع هر دو اسکله در نقاط مختلف طی عملیات ویژه‌ای آزمایش شد و با انجام تحلیل‌های مربوطه طول شمع‌ها برآورد شد. نسبت طول به قطر شمع‌ها در این مطالعه در محدوده 30 تا 50 است و دسترسی مستقیم به راس شمع‌ها نیز وجود ندارد. لذا چالش اصلی این بود که آیا بکارگیری آزمایش PIT پاسخگو خواهد بود؟ روند انجام عملیات، تحلیل‌های مربوطه و نتایج حاصله و همچنین بحث در مورد دقت آن‌ها در این مقاله پرداخته شده است.

## 2- آزمایش کنترل یکپارچگی شمع (PIT)

آزمایش ارزیابی یکپارچگی شمع‌ها (PIT) یک روش موثر در تعیین محل آسیب‌دیدگی شمع‌های بتن درجا و کوبیدنی محسوب می‌شود. با توجه به اینکه انجام این آزمایش به برنامه‌ریزی قبلی و نصب لوله‌های دسترسی نیاز ندارد، بر روی کلیه شمع‌های بتنی پس از نصب آنها قابل انجام است. با توجه به کاهش قابل ملاحظه هزینه انجام این آزمایش، استفاده از آن به شدت رو به گسترش است. گرچه یک مهندس باتجربه با یک نگاه اجمالی به نتایج بدست آمده ممکن است بتواند راجع به وضعیت کلی شمع اظهار نظر نماید، اما لازم است نتایج این آزمایش به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد. پیشرفت‌های اخیر صورت گرفته در نحوه انجام تحلیل نتایج این آزمایش، با هزینه‌های منطقی استفاده از تفسیرهای غیراستدلالی (حسی) را کاهش داده است.

در صورتی که لوله‌های دسترسی در شمع‌های مشکوک از لحاظ یکپارچگی به منظور انجام آزمایش CSL و یا SSL نصب نشده باشند (نصب لوله‌های دسترسی مستلزم برنامه‌ریزی قبلی و هزینه‌های اضافی است)، هزینه ارزیابی شمع‌ها می‌تواند به شدت افزایش یابد. انجام عمل مغزه‌گیری هر شمع نیز علاوه بر گران بودن کار مشکل می‌باشد. حتی در صورت انجام آن، به علت کوچک بودن ابعاد نمونه گرفته شده، آسیب دیدگی‌های موضعی در بعضی اعماق قابل تشخیص نخواهد بود. بنابراین تنها روش عملی، استفاده از آزمایش یکپارچگی شمع است. این آزمایش به علت سادگی و ارزان بودن، در صورت نیاز می‌تواند جهت ارزیابی کلیه شمع‌های موجود در یک سایت مورد استفاده قرار گیرد. در اغلب موارد یک نمونه آماری از شمع‌ها جهت انجام این آزمایش انتخاب می‌شود. در صورت سالم بودن این شمع‌ها انجام این آزمایش متوقف می‌شود. اما در صورت وجود نقطه ضعف در تعدادی از این شمع‌ها، تعدادی آزمایش‌های اضافی بر روی شمع‌های مجاور آنها صورت می‌گیرد. انتخاب شمع‌های مورد آزمایش می‌تواند با توجه به مشاهدات اجرائی و یا به صورت تصادفی صورت گیرد.

ابزار مورد نیاز جهت انجام آزمایش یکپارچگی شمع عبارتند از: چکش دستی (که ممکن است دارای سنسور اندازه‌گیری نیرو نیز باشد)، سنسور حرکتی و دستگاه تحلیل‌کننده (شکل 1). سنسور حرکتی معمولاً از نوع شتاب‌نگاشت است که با انتگرال‌گیری نسبت به زمان به سرعت قابل تبدیل است.



شکل 1- شماتیک ابزار مورد نیاز جهت انجام تست یکپارچگی شمع (PIT)

## 2-2- روش انجام آزمایش یکپارچگی شمع و تفسیر نتایج

با اعمال ضربه توسط چکش دستی به رأس شمع، موج فشاری با کرنش کم در شمع ایجاد می‌شود. هنگامی که این موج فشاری پائین رونده به تغییر مقطع یا تغییر خواص در طول شمع برخورد می‌کند، یک موج کششی بالا رونده در شمع ایجاد می‌شود که این پالس توسط سنسور نصب شده در رأس شمع احساس می‌شود. رکوردهای سرعت و همچنین انعکاس‌های ایجاد شده از نوک شمع و یا از محل گسستگی‌ها بصورت گرافیکی رسم می‌شود. اطلاعات فوق در دیسک سخت نیز ذخیره می‌شوند. محل آسیب دیدگی براساس میزان سرعت موج در شمع و وسعت منطقه آسیب دیده با توجه به بزرگی انعکاس ایجاد شده تخمین زده می‌شود.

هنگامی که ضربه به رأس شمع نواخته می‌شود، یک فشردگی لحظه‌ای در رأس شمع ایجاد شده و موجب حرکت ذره به سمت پایین در سطح فوقانی شمع می‌گردد. این فشردگی ناشی از نیروی ضربه چکش،  $F$ ، است که موجب حرکت رو به پایین ذره با سرعت  $V$  می‌گردد. این حرکت ذره‌ای به صورت موج کرنش (یا تنش) فشاری به سمت پایین در طول شمع منتشر می‌گردد. سرعت انتشار این موج کرنشی،  $c$ ، تابع خواص و جنس شمع است. در فولاد سرعت این موج  $5130\text{m/s}$  است. اما در بتن سرعت موج تنش،  $c$ ، دارای محدوده‌ای بین  $3000\text{m/s}$  تا  $4500\text{m/s}$  است. رابطه  $c$  با خواص مصالح شمع از معادله (1) تبعیت می‌کند:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

که در آن  $E$  مدول الاستیک شمع و  $\rho$  جرم مخصوص آن است.

موج فشاری پائین رونده تنش چنانچه در طول مسیر حرکت خود در استوانه شمع به تغییر در امپدانس شمع برخورد نماید، انعکاسی ایجاد کرده و موج انعکاس یافته پس از طی مسیر در رأس شمع توسط حسگر نصب‌شده ثبت می‌گردد. امپدانس مقطع شمع،  $Z$ ، تابعی از خواص الاستیک و سطح هندسی شمع است.

$$Z = \frac{EA}{c} \quad (2)$$

که در آن  $A$  سطح مقطع شمع است. چنانچه در هر یک از کیفیت مصالح بتن ( $\rho$  یا  $E$ ) و یا هندسه مقطع ( $A$ ) در طول حرکت مسیر موج تغییری ایجاد شود، یا به عبارت دیگر امپدانس شمع تغییر یابد، انعکاسی در موج ایجاد می‌گردد. بزرگترین تغییر در امپدانس شمع در نوک تحتانی آن اتفاق می‌افتد که در واقع امپدانس به ناگهان به صفر کاهش می‌یابد و انعکاسی رو به بالا ایجاد می‌گردد.

زمانی که طول می‌کشد تا انعکاسات ناشی از تغییرات امپدانس یا انعکاسی در نوک شمع به سطح فوقانی در رأس شمع بازگردد تابعی از فاصله رأس شمع تا نقطه انعکاس موج و همچنین سرعت انتشار موج است. بنابراین با توجه به ثابت بودن سرعت موج در طول شمع می‌توان زمان را به طول یا مسافت تبدیل نمود. هر یک از دو حالت زیر توسط مهندس انجام آزمایش ممکن است بکار گرفته شود:

1- فرض شود که طول شمع دقیقاً مشخص است و در نتیجه سرعت انتشار موج از زمان رفت و برگشت موج به نوک شمع و انعکاس رو به بالا محاسبه می‌گردد.

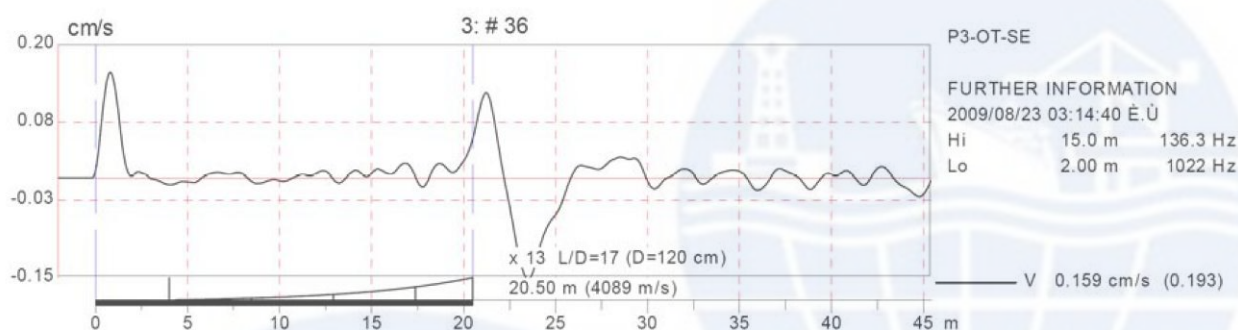
2- اگر طول شمع معلوم نباشد، باید سرعت موج را با توجه به جنس مصالح شمع فرض نمود و بعد طول شمع را با توجه به زمان رفت و برگشت موج از انعکاس نوک شمع محاسبه نمود. در نتیجه دقت اندازه‌گیری طول شمع به دو عامل بستگی خواهد داشت. اول اینکه سرعت معقولی برای انتشار موج فرض گردد. دوم آنکه انعکاس واضحی از نوک شمع حاصل گردد.



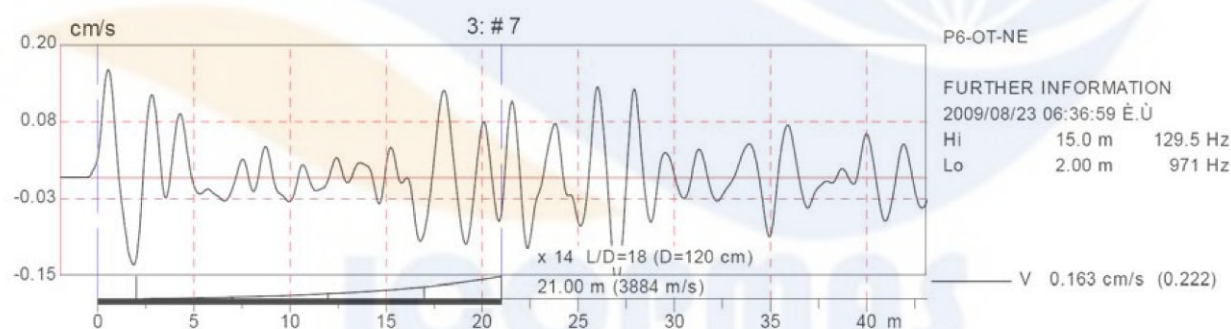
مشکل اصلی در شمع‌های بتنی انتخاب سرعت معرف انتشار موج در مصالح شمع است. منشاء مشکل این است که بازه سرعت انتشار موج طولی در شمع بین  $3000\text{m/s}$  تا  $4500\text{m/s}$  است که بازه گسترده‌ای است و پتانسیل خطای تا حد 50% وجود دارد. همچنین وجود خاک اطراف شمع موجب میرایی بالای موج طولی شده و بنابراین بزرگای انعکاس موج از نوک به شدت کاهش می‌یابد و در بعضی موارد قابل تشخیص نیست. در ادامه در مورد نحوه غلبه بر هر یک از دو مشکل فوق در عملیات این پروژه بحث خواهد شد.

مطابق شکل 2، خروجی آزمایش یکپارچگی شمع، نمودار مسیر موج سرعت برحسب طول شمع است. شمع‌های سالم فقط انعکاس از محل نوک شمع را نشان می‌دهند شکل 2- الف، در حالیکه شمع‌های آسیب دیده انعکاسی زودتر از زمان  $2L/c$  طول شمع و  $c$  سرعت موج در شمع می‌باشد) از محل آسیب‌دیدگی را نشان می‌دهد شکل 2- ب.

بطور کلی موج ورودی پائین رونده پس از زمان  $2L/c$  از ضربه چکش با انعکاس از نوک شمع به رأس شمع بازمی‌گردد. البته با توجه به اینکه در این حالت، موج طولانی‌ترین مسیر را پیموده است، بزرگی موج به علت میرایی داخلی (بتن) و میرایی خارجی (خاک) به شدت کاهش می‌یابد. انعکاسات حاصله از محل آسیب‌دیدگی‌ها نیز مشمول این امر می‌گردد. بدین ترتیب شناسایی آسیب دیدگی‌هایی که در عمق بیشتری قرار دارند مشکل می‌گردد. به منظور حل این مشکل، توابع نمایی بزرگ شوند بر مسیر موج اعمال می‌گردند، بطوریکه مقدار این توابع تا زمان  $2L/c$  بطور نمایی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب سیگنال‌های بسیار ضعیف بدست آمده از عمق‌های زیاد راحت‌تر آشکار می‌گردد. این توابع نمایی در شکل 2 نمایش داده شده‌اند.



الف) شمع سالم



ب) شمع معیوب

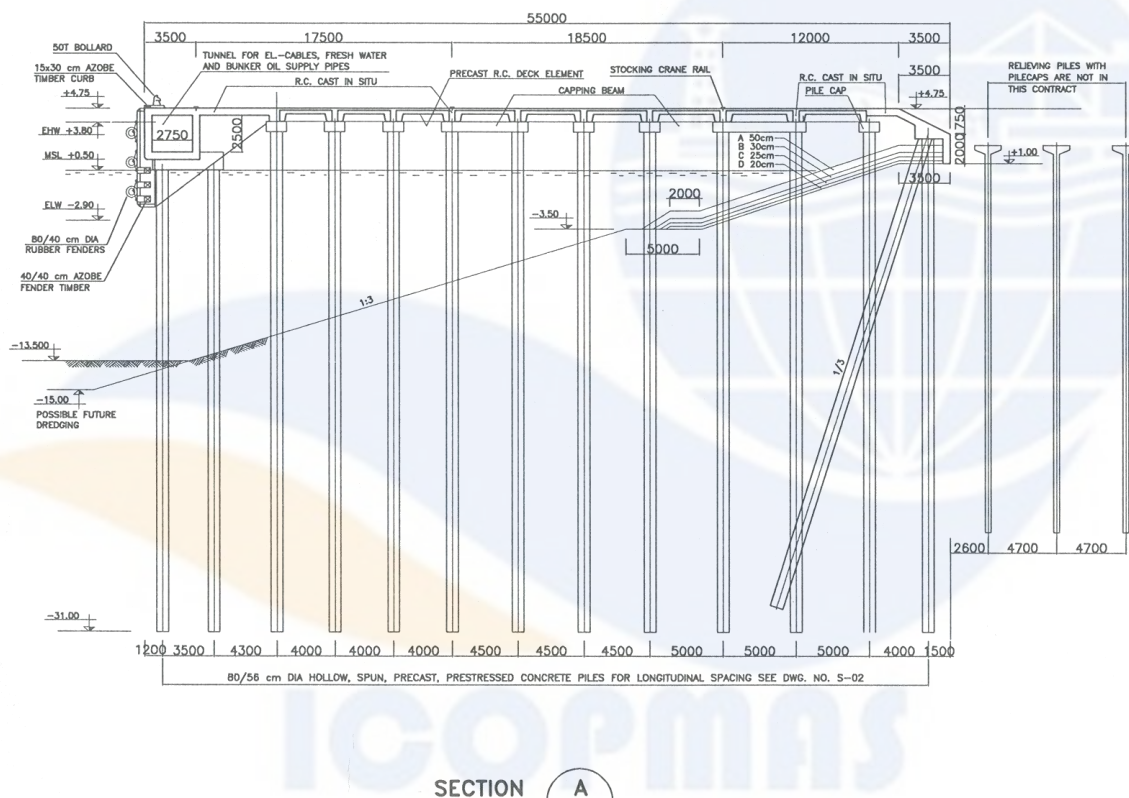
شکل 2- نمودار مسیر موج سرعت در طول شمع بدست آمده از تست یکپارچگی شمع

### 3- معرفی پروژه اسکله‌های 10 و 14 پست بندر امام

محدوده بندر امام خمینی و ماهشهر در بخش انتهایی خلیج فارس و در مصب رودخانه جراحی قرار دارد. شاخه‌های رودخانه در ناحیه مصب تشکیل دلتاهای متعددی را می‌دهند. این رودخانه که از ارتفاعات سرچشمه می‌گیرد، در این محل منشعب شده و شروع به رسوب‌گذاری ذرات ریزدانه اعم از رس و لای می‌کند. از طرفی براساس نقشه‌های زمین‌شناسی موجود، منطقه بر روی رسوبات دوران چهارم زمین‌شناسی واقع شده است. بخش‌های زیادی از این منطقه در محدوده جزر و مدی آب دریا قرار داشته و در مواقع مد به زیر آب می‌رفته است. در نتیجه با توجه به مدل‌های دلتایی موجود، این منطقه توسط رسوبگذاری مخلوطی از فرآیندهای سازنده (رودخانه‌ای) و مخرب (جزر و مدی) بوجود آمده است. وجود دو نوع رخساره رسوبی در فاصله منطقه رسوب‌گذاری از مصب رودخانه و عملکرد جزر و مد باعث گردیده که از لحاظ گستره عرضی و

عمقی تفاوت‌هایی در لایه‌ها بوجود آید، هر چند که روند تغییرات نوعی پیوستگی در لایه‌های موجود را نشان می‌دهد که می‌توان آن را به صورت کلی به دو نوع رخساره دلتایی خارج از آب (Alluvial Deposit) و رخساره دلتایی زیر آب (Delluvial Deposit) تقسیم نمود. لایه-بندی خاک در محدوده بندر امام و سایر مناطق ماهشهر عمدتاً تا عمق 20 الی 25 متر متشکل از لایه‌های نرم تا متوسط رسی بوده و به تدریج به توالی لایه‌های رس و ماسه‌ای سفت و متراکم، به صورتی بسیار متغیر و ناهمگون در منطقه، برخورد می‌شود.

اسکله‌های 10 و 14 پست در بندر امام خمینی در اواسط دهه 70 میلادی توسط شرکت Zublin آلمان احداث شده‌اند. این دو اسکله طویل که عمدتاً برای حمل و نقل کشتی‌های فله‌بر بهره‌برداری می‌گردند، بر روی شمع‌های بتنی پیش‌تنیده مدور توخالی از نوع سانتریفیوژ و به قطر خارجی 800 میلیمتر مستقر شده‌اند. شمع‌های سانتریفیوژ در محل به روش دورانی حول محور طولی و به صورت یکپارچه و بدون هیچ اتصالی (Splice) تولید و توسط چکشی در بستر دریا کوبیده شده‌اند. با توجه به تغییرات غیر عادی لایه‌بندی خاک در فواصل کم، وجود لنز و میان‌لایه‌های کاملاً تصادفی و همچنین تغییرات شیب و ضخامت لایه‌ها در جهات عرضی و طولی اسکله، انتظار می‌رود که طول‌های متغیری از شمع‌ها به دست آید. شکل 3 مقطعی تیب از نقشه‌های اجرائی اسکله را نشان می‌دهد. شکل 4 مقطع سه ردیف جلوئی از شمع‌ها را به همراه ترازهای مورد انتظار برای کشتی با ظرفیت‌های 40/000 تا 100/000 تن را نشان می‌دهد که توسط مشاور طرح بر اساس تحلیل‌های لازمه ارائه شده است. مقرر شده بود که نتایج حاصل از آزمایش‌های PIT به منظور برآورد طول شمع‌ها، ظرفیت اسکله بر اساس انواع شناورهای طرح را مشخص نماید.



شکل 3- مقطع عرضی تیب اسکله‌های 10 و 14 پست

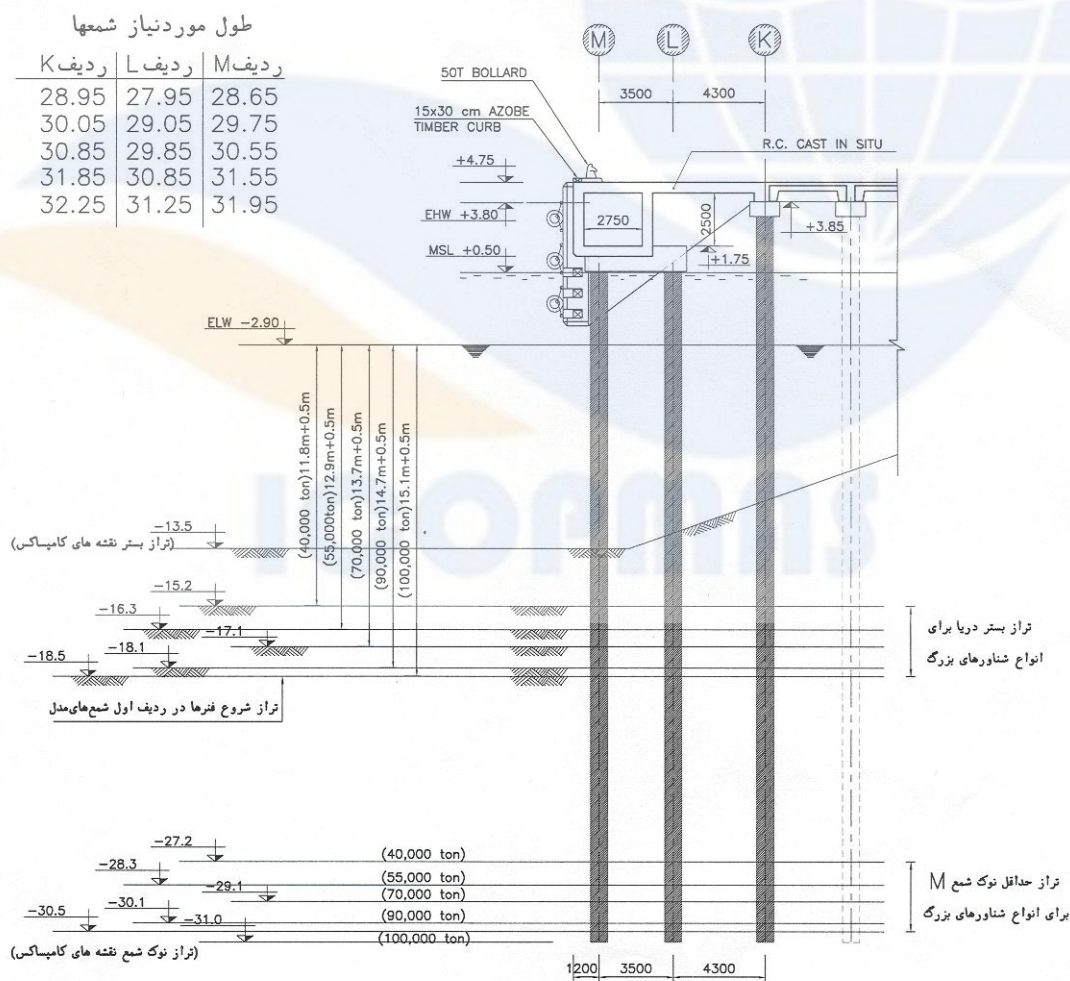
بتن و میلگرد کلاهدک و تیرهای سر شمع‌ها دچار آسیب و خوردگی شده بودند و عملیات ترمیمی بیش از ده سال پیش بر روی آنها انجام شد. اما نکته جالب توجه آنکه به شمع‌ها آسیب خاصی وارد نشده بود و آثاری از خوردگی دیده نمی‌شد. عملیات ترمیم طی یک پروژه چندساله در نیمه دوم سال 1379 ه.ش. انجام شد. شکل 5 نشان‌دهنده عدم آسیب شمع‌ها، حتی در محدوده جزر و مد و تر و خشک شدن (splash zone) می‌باشد. علت این امر تکنولوژی مناسب روش تولید شمع‌ها بوده است، بطوریکه نیروی گریز از مرکز دوران موجب افزایش دانسیته و کاهش تخلخل بتن و در نتیجه کاهش نفوذپذیری می‌گردد. از طرف دیگر پیش‌تنیدگی موجب کاهش احتمال وقوع ترک می‌گردد. بنابراین، امکان نفوذ کلر و سایر عوامل خوردنده به میلگردها کاهش می‌یابد. برای اطلاعات مبسوط‌تر راجع به مشخصات طرح و عملیات انجام‌شده می‌توان به فخریان (1386) مراجعه نمود.

همانطور که در شکل 4 مشاهده می‌گردد، ردیف‌های اول، دوم و سوم شمع‌ها به ترتیب M، L و K نامیده شده‌اند. طول مورد نیاز هر ردیف برای ظرفیت‌های کشتی مورد نظر نیز در جدولی در همان شکل مشخص شده‌اند. محدوده طولی مورد نیاز برای ردیف جلو 28/65 متر برای ظرفیت 40/000 تن و 31/95 متر برای ظرفیت 100/000 تن توسط مشاور طرح برآورد شده‌اند. به همین ترتیب برای ردیف دوم یعنی L طول‌های مورد انتظار بین 27/95 و 31/25 متر و برای ردیف سوم یعنی K طول‌های مورد انتظار بین 28/95 و 32/25 متر برآورد شده‌اند. بر روی رأس شمع‌های ردیف اول سمت آب (M) باکسی بتنی به ابعاد 2/75 متر قرار دارد که طی عملیات میدانی به منظور دسترسی به سرشمع‌ها جهت نواختن ضربه استفاده می‌شد (شکل 7- پ). بر روی راس شمع‌های ردیف دوم (L) یک تیر بتنی قرار دارد که از زیر اسکله برای نواختن ضربه به طور مستقیم قابل دسترس است (شکل 7- الف). شمع‌های ردیف سوم (K) و همچنین ردیف چهارم به بعد مستقیماً تا زیر عرشه اسکله امتداد می‌یابند. جزئیات را می‌توان در شکل 4 ملاحظه نمود.

آزمایش کنترل یکپارچگی شمع (PIT، (Pile Integrity Test)، بر روی بیش از 30 مورد از شمع‌های اجرا شده قدیمی اسکله‌های 10 و 14 پست در بندر امام خمینی به منظور برآورد طول آن‌ها انجام شد. اسکله‌های 10 و 14 پست در مجاورت هم و به طول تقریبی 5000 متر و پهنای 55 متر می‌باشند.

هدف اصلی از انجام آزمایش کنترل یکپارچگی شمع (PIT) برآورد طول شمع‌های اجرا شده، به ویژه در ردیف‌های نزدیکتر به سمت پهلوگیری کشتی، به منظور ارزیابی گسترش ظرفیت اسکله‌های 10 و 14 پست بندر امام خمینی بوده است. شکل 6 نمایی از اسکله‌های مذکور را نمایش می‌دهد.

مکاسبه طول مورد نیاز شمع‌ها بر اساس انواع شناورهای طرح







شکل 5- نمایی از شمع‌های ردیفهای دوم (L) و سوم (K) - جدار شمع‌ها در محدوده جزر و مد با موجودات دریایی (نام محلی گچسار) پوشیده شده



شکل 6- نمایی از اسکله‌های 10 و 14 پست بندر امام خمینی

#### 4- عملیات میدانی

تست‌ها با دستگاه PIT و مطابق با استاندارد ASTM D-5882 انجام شده‌اند. همانطور که گفته شد، PIT یا تست کنترل یکپارچگی شمع در واقع یک تست کرنش پائین است که با نصب یک گیج حساس اندازه‌گیری شتاب بر روی راس شمع (یا بر روی جدار جانبی شمع) و اعمال ضربه با چکش دستی ویژه انجام می‌گردد. نقاط نصب گیج و اعمال ضربه با دستگاه ساب صیقل شد. پس از اعمال ضربه، موج تنش طولی در شمع ایجاد شده که به سمت پائین شمع منتقل می‌گردد. روند انجام تست‌ها و نمونه‌هایی از شمع‌های تست شده در شکل 7 ارائه شده است. تغییرات در شکل و مصالح شمع موجب انعکاساتی در موج می‌گردد که در راس شمع قابل اندازه‌گیری و ثبت هستند. کلیه این انعکاسات در سطح فوقانی شمع ثبت شده و تجزیه و تحلیل می‌گردند تا اطلاعاتی از وضعیت شمع در طول به دست آید. عمیق‌ترین انعکاس مربوط به نوک شمع خواهد بود. از شتاب‌های ثبت شده نسبت به زمان انتگرال گرفته تا آنکه سرعت حاصل شود و معمولاً تحلیل‌ها و پردازش‌ها بر روی سیگنال سرعت انجام می‌گیرد.

در این پروژه به خصوص که هدف برآورد طول شمع‌ها بود مراحل ویژه‌ای توسط مشاور به ترتیب زیر برنامه‌ریزی و اجرا شد:

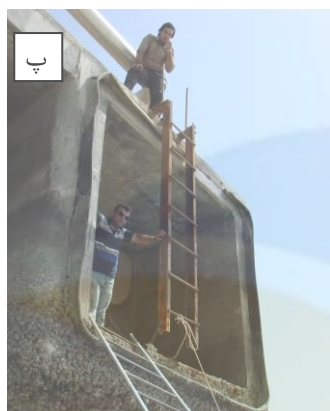
- 1- حمل تجهیزات، گیج‌ها، چکش استاندارد و سایر ملحقات لازم برای تست PIT به محل
- 2- استقرار تجهیزات تست PIT و سایر لوازم از جمله دستگاه ساب یا برس برقی، موتور برق، .... در قایق موتوری و انتقال اکیپ به زیر اسکله و در مجاورت شمع‌های مورد نظر



- 3- برس زدن نقطه مورد نظر برای استقرار گیج ثبت شتاب بر روی جدار شمع  
 4- نواختن ضربه بر روی نزدیکترین نقطه به راس شمع و ثبت موج شتاب توسط دستگاه  
 5- پردازش و تحلیل نتایج به منظور برآورد طول شمع

در انجام مراحل فوق توجه به نکات زیر ضروری است:

- در شمع‌های ردیف جلو یعنی M، ضربه از درون باکس آدم‌رو به راستای راس شمع نواخته می‌شود. (شکل‌های 4 و 7)
- در شمع‌های ردیف دوم یعنی L، ضربه بر روی تیر واسط بین ردیف‌های M و L نواخته می‌شود. (شکل‌های 4 و 7) برای این منظور ابتدا لازم بود که رسوبات نرم روی تیر که در مواقع بالا آمدن تراز آب در شرایط مد بر روی تیر تشکیل می‌گردد، با بیل دستی پاکسازی گردد.
- در شمع‌های ردیف سوم (K) و چهارم ضربه بر روی دال عرشه در نقطه‌ای که در امتداد محور شمع باشد نواخته می‌شود. (شکل‌های 4 و 7)
- طول بین نقطه نصب گیج و راس شمع برای تمامی شمع‌های آزمایش شده با متر اندازه‌گیری و به مقدار حاصله از تحلیل به منظور محاسبه طول کل شمع اضافه گردیده است.
- به منظور دسترسی قایق به زیر اسکله، عملیات در ساعات محدودی در شبانه‌روز قابل انجام بود، بطوریکه بازه زمانی مفید در هر نوبت صبح یا عصر حدود 2 الی 3 ساعت بیشتر نبود. با توجه به مسافت قابل توجه برای دسترسی به محل مورد نظر توسط قایق و همچنین محدودیت زمان جزر، رعایت زمان‌بندی و سرعت عمل ویژه بین تیم عملیات مستقر در قایق و تیم مسئول تعیین موقعیت راس شمع در بالای اسکله (روی عرشه یا داخل باکس آدم‌رو) و نواختن ضربه ضروری بود.



شکل 7- روند انجام تست‌ها، الف) وضعیت راس شمع‌های ردیف دوم (L) - امکان نواختن ضربه چکش روی تیر شمع به طور مستقیم، ب) وضعیت راس شمع‌های ردیف‌های سوم به بعد (K، L، ...) و کلاهک سر آن - ضربه چکش از روی عرشه در محل محور طولی شمع، پ) در شمع‌های ردیف جلو (M)، ضربه از درون باکس آدم‌رو به راستای راس شمع نواخته می‌شود، ت) عملیات پاکسازی تیر سر شمع ردیف دوم (L) جهت نواختن ضربه چکش، ث) پاکسازی جدار شمع از «گچسار» جهت نصب گیج ثبت اطلاعات و ج) نصب گیج و نواختن ضربه جهت ثبت سیگنال

برای تعیین طول شمع‌ها با استفاده از این روش لازم است پارامتر سرعت موج بطور دقیق تعیین گردد. به منظور کالیبره کردن دستگاه، آزمایش بر روی دو شمع باقی‌مانده در روی زمین (P1 و P2) انجام شد. سرعت موج طولی در شمع برای تحلیل سایر شمع‌ها بر اساس نتایج تست‌های کالیبراسیون  $4000 \text{ m/s}$  حاصل شد.

بر روی 31 شمع زیر اسکله (P3، P4، PP1 تا PP13 و PP23 تا PP38) به منظور برآورد طول، آزمایش PIT انجام شد. شکل 8 دو نمونه از سیگنال‌های منتخب حاصل از تست‌ها که شامل تغییرات سرعت نسبت به زمان می‌باشد را نشان می‌دهد. امواج سرعت با استفاده از انتگرال‌گیری نتایج ثبت شده توسط گج شتاب ارائه می‌گردد.

در ارزیابی نتایج سیگنال‌های بدست آمده توجه به این نکته ضروریست که افزایش در امپدانس شمع موجب کاهش در موج سرعت شده و بالعکس. یعنی افزایش در موج سرعت به مفهوم کاهش در سطح مقطع، کاهش در مدول الاستیک، ایجاد فضا، حفره یا نفوذ مصالح ضعیف در داخل شمع و یا ترکیبی از موارد فوق است. دلایل دیگری مانند پارازیت یا انعکاس ثانویه امواج نیز ممکن است موجب نوسانات در امواج ثبت شده توسط تست PIT گردد. چنین نوساناتی توسط مهندس با تجربه تحلیل نتایج تست PIT قابل شناسایی و حذف است. به ویژه در این پروژه به لحاظ اینکه ضربه به عناصر سازه‌ای مختلف متصل به سر شمع نواخته می‌شد، طبیعتاً پارازیت‌ها و انعکاسات مزاحمی در امواج ثبت شده مشاهده می‌گردد. وجود این پارازیت‌ها تجزیه-تحلیل نتایج ثبت شده را با دشواری‌هایی همراه می‌سازد. مهمترین نکته در تحلیل موج‌های ثبت شده تشخیص انعکاس نوک شمع است.

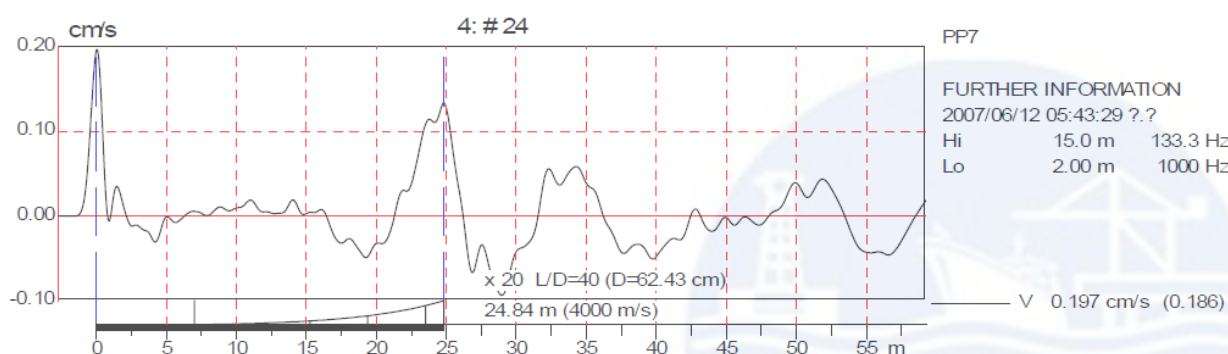
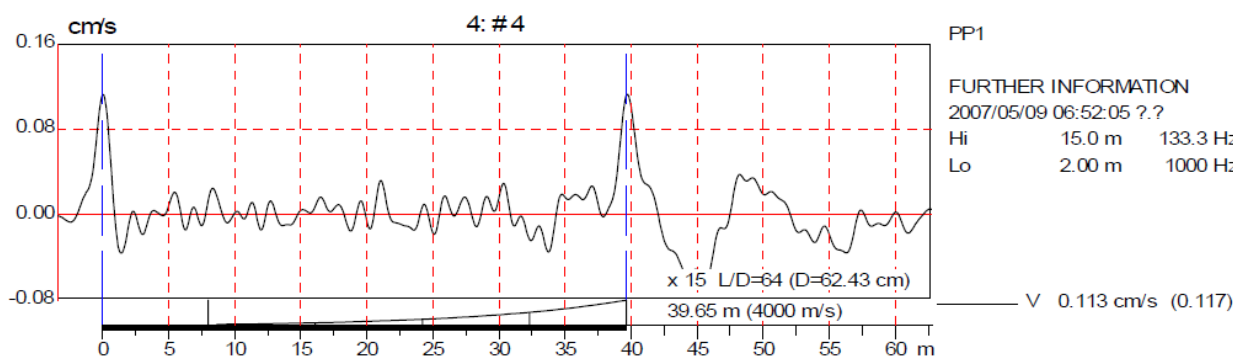
موج‌های مناسب برای تحلیل با سعی و خطای زیاد شناسایی و ثبت می‌شد. در هر نقطه که ضربه نواخته شده معنی‌دار به نظر می‌رسید، میانگین حاصل از 4 ضربه متوالی ثبت می‌شد. سپس محل اعمال ضربه قدری تغییر یافته، و در صورتیکه موج مناسبی به دست می‌آمد، مجدداً 4 ضربه متوالی نواخته و میانگین ثبت می‌شد. برای هر شمع به طور متوسط 10 موج ثبت شده که هر کدام میانگین 4 ضربه متوالی است. لذا برای هر شمع حداقل 40 ضربه نواخته شده و نتایج ثبت شده است. در نهایت بهترین و معرفتین موج ثبت شده برای هر شمع که همخوانی معقولی در مقایسه با سایر امواج داشت، گزارش گردید.

در مورد نتایج برآورد طول شمع‌ها از راس شمع در محل اتصال به کلاهدک تا نوک شمع، می‌توان به نکات ذیل اشاره نمود:

- محدوده طول شمع‌ها برای تمامی 31 شمع تست شده بین  $24/4$  متر (شمع P3 در ردیف A) و  $40/2$  متر (شمع PP1 در ردیف K) حاصل شده است. میانگین طول کل شمع‌ها 33 متر است.
- تعداد 15 شمع از ردیف اول سمت آب (ردیف M) تست شده است. محدوده طول این شمع‌ها بین  $29/5$  متر (شمع PP30) و  $38/1$  متر (شمع PP26) حاصل شده است. میانگین طول شمع‌های ردیف اول  $33/7$  متر است. به غیر از شمع PP30 که طول آن  $29/5$  متر حاصل شده، طول سایر شمع‌های این ردیف بیش از 30 متر بدست آمده است.
- تعداد 4 شمع در ردیف دوم (ردیف L) تست شده است که محدوده طول آنها بین  $25/2$  متر تا  $34/6$  متر با میانگین  $29/5$  متر است.
- تعداد 10 شمع در ردیف‌های J، I و K تست شده (6 مورد ردیف K یا در واقع ردیف سوم) که محدوده آنها بین  $30/2$  متر تا  $40/2$  متر و با میانگین  $35/3$  می‌باشد. علت بیشتر بودن میانگین طول این ردیف‌ها، بالاتر بودن تراز راس این شمع‌ها ( $+3.85$ ) در مقایسه با تراز راس شمع‌های ردیف‌های M و L ( $+0.50$ ) است.

همانطور که ملاحظه گردید، محدوده طول شمع‌ها بین 25 تا 40 متر است. با توجه به قطر 800 میلیمتری شمع‌ها، نسبت طول به قطر شمع‌ها 30 الی 50 بوده است. انعکاس نسبتاً واضح موج طولی از نوک شمع در اغلب تست‌ها در حوالی طول‌های ذکر شده که همخوانی قابل قبولی با نقشه‌های اجرائی دارد حاکی از موفقیت تست‌ها برای چنین محدوده‌ای از نسبت طولی شمع دارد. عوامل مختلفی که برای موفقیت نتایج برای چنین نسبت طولی بالا برای شرایط پروژه ذکر نمود عبارتند از:

- عدم وجود اتصال (splice) در طول شمع‌ها
- کیفیت بالای بتن از لحاظ داشتن تخلخل حداقل و همگنی مناسب و عدم آسیب در طول شمع
- توخالی بودن شمع که به کاهش میرایی موج در مصالح شمع کمک می‌نماید
- دقت در عملیات از لحاظ هماهنگی بین اکیپ نصب ابزار و نفر اعمال ضربه از بالای عرشه



شکل 8- سیگنال‌های بدست آمده از شمع شماره PP1 به طول 40/2 متر و شمع شماره PP7 به طول 25/2 متر

## 6- بحث و نتیجه گیری

- تست PIT بر روی 31 مورد از شمع‌های ردیف‌های اول تا چهارم اسکله‌های 10 و 14 پست بندر امام به منظور برآورد طول شمع‌ها انجام شد. کالیبراسیون انتشار موج با استفاده از تست بر روی 2 شمع موجود بر روی زمین که از زمان اجرای شمع‌ها باقی مانده بعمل آمد. پردازش و تحلیل بر روی نتایج انجام گردید. بر اساس نتایج ارائه شده در این گزارش می‌توان نتیجه‌گیری و توصیه‌های فنی را مطابق زیر خلاصه نمود:
- با توجه به اطلاعات بدست آمده، طول‌های برآورد شده حداقل‌های مورد نیاز مشاور را تامین می‌نماید.
  - علیرغم مشکل پارازیت و انعکاسات مزاحم، نکته مثبت در برآورد طول شمع‌های این پروژه، کیفیت یکنواخت شمع‌ها از لحاظ هندسی و دانسیته مصالح شمع، یا در واقع امیدانس شمع است.
  - در صحت و دقت تجزیه-تحلیل نتایج دو فرض اساسی نهفته است. اول آنکه شمع‌ها دارای اتصال (splice) نیستند و بلکه در کل طول یکپارچه هستند. فرض دوم آنکه شمع‌های تست شده دارای آسیب فیزیکی نیستند. چنانچه هر یک از دو فرض فوق نقض شود، نتایج تحلیل و برآورد طول ممکن است دچار خطا گردد.
  - به منظور کنترل دقت برآورد طول‌ها، تنها راهکار عملی و قابل اطمینان، دسترسی مستقیم به راس شمع و تکرار تست و یا کنترل نتایج بر روی شمعی است که طول دقیق آن در اختیار است.

## 7- تشکر و قدردانی:

بدینوسیله از اداره کل بندر استان خوزستان، بندر امام خمینی و شرکت تدبیرساحل پارس برای حمایت مالی پروژه تشکر و قدردانی می‌گردد. عملیات مربوطه که توسط شرکت ژئومحیط پارس تهیه شده و اطلاعاتی که در اختیار این پژوهش گرفته نیز موجب سپاس مؤلفین است.



- Cunha, R.P. (2008). "Quality evaluation criteria for pile integrity test on deep foundation bored in tropical soil", *Proc. of the 8th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, Lisbon, Portugal, pp. 465–470.
- Sack, D., Olson, L. & Tinkey, Y. (2008). "In-place nondestructive evaluation of foundations of unknown type and depth", *Proc. of the 8th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, Lisbon, Portugal, pp. 443–451.
- Rausche, F. and Likins, G. (1993). "Interpretation of Low Strain Pile Test Records", "P.I.T Collector User's Manual" Pile Dynamics, INC. pp. B3–B12.
- White, B., Nagy, M. & Allin, R. (2008). "Comparing cross-hole sonic logging and low-strain integrity testing results", *Proc. of the 8th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, Lisbon, Portugal, pp. 471–476.
- Morgano, C.M. (1996). "Low Strain Testing of Piles Utilizing Two Acceleration Signals". Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles (STRESSWAVE '96): Orlando, FL; 859–869.
- Massoudi, N. and Teferra, W. (2004). "Non-Destructive Testing of Piles Using the Low Strain Integrity Method". Proceedings of the Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering: New York, NY; 1–6.
- ASTM Standard D 5882 (2000). "Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations," ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- فخاریان، کاظم و فیضی، شهرام، (1386). آزمایش‌ها و تحلیل‌های دینامیکی در طراحی و اجرای شمع‌ها، وزارت راه و ترابری - معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل، 133 صفحه.
- فخاریان، کاظم (1386). تست یکپارچگی شمع (PIT) - تعیین طول شمع‌های سانتریفیوژ اسکله‌های 10 و 14 پست بندر امام خمینی، گزارش گزارش شماره 1، پروژه شماره د-10-1031، شرکت ژئومحیط پارس.

ICOPMAS