

تأثیر هندسه بدنه شمع بر تفسیر نتایج آزمایش یکپارچگی به کمک شبیه سازی عددی

مریم منصوری^۱، سید احسان سیدی حسینی نیا^۲، سعید ابریشمی^۳

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: eseyedi@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

چکیده

مهمترین نکته در آزمایش یکپارچگی شمع، تفسیر صحیح نتایج آن است. در این پژوهش سعی شده است تا با بررسی اثر وجود خاک، ابعاد نقص موجود در شمع و محل قرارگیری نقص در شمع به تفسیر هرچه بهتر نتایج آزمایش یکپارچگی شمع پرداخته شود. تشخیص صحیح طول و عمق نقص در بدنه شمع از جمله عواملی است که تحت تأثیر محل نقص و برهم‌کنش امواج گذرنده داخل شمع قرار دارد. در این پژوهش، آزمایش یکپارچگی شمع بصورت عددی، شبیه سازی شده و با اعمال بار ضربه‌ای به صورت نیمه سینوسی بر سر شمع، نتایج آن، مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج، بهترین محل برای نصب شتاب سنج به عنوان گیرنده امواج در فاصله ۰.۶ برابر شعاع شمع بدست آمد که با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. برای شمع مدفون در خاک، هرچه موقعیت نقص به محل ضربه نزدیک‌تر باشد، آثار میرایی خاک کاهش یافته و نتایج به شمع آزاد نزدیک‌تر می‌شود. در صورت وجود نقص باریک شدگی، استفاده از قله اول و در صورت وجود نقص برآمدگی، استفاده از قله دوم برای تخمین عمق نقص از روی رکوردهای سرعت شمع آزاد توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: آزمایش یکپارچگی شمع، نظریه توزیع امواج یک‌بعدی، آثار سه‌بعدی انتشار امواج، شبیه‌سازی عددی، نقص.

۱- مقدمه

از جمله نگرانی‌های موجود برای مهندسان عمران، سلامت بدنه شمع بتنی درجاریز پس از اجرای آن است. در صورت وجود نقص در بعضی قسمت‌های شمع، ممکن است در انتقال بار به لایه‌های پایین‌تر مشکلاتی به وجود بیاید. از این رو، آزمایش میدانی به نام «آزمایش یکپارچگی شمع» یا PIT (Pile Integrity Test) تعریف شده است. این آزمایش به منظور بررسی سلامت بدنه شمع و اندازه‌گیری طول شمع انجام می‌شود. بدین صورت که با اعمال ضربه به سر شمع و دریافت امواج توسط گیرنده در بالای شمع، شکل امواج عبوری از داخل شمع بررسی شده و سلامت شمع مطالعه می‌شود.

مطالعات انجام‌شده روی آزمایش یکپارچگی شمع شامل مطالعات عددی، آزمایشگاهی و میدانی بوده است. مطالعات عددی به دو بخش تحلیل یک‌بعدی و سه‌بعدی تقسیم‌بندی می‌شود. مبانی اولیه نظریه امواج یک‌بعدی توسط اسمیت [1] انجام شده است. مدل پیشرفته‌تر نظریه امواج یک‌بعدی توسط لی و همکاران [2] معرفی شده است. در بخش بزرگی از مطالعات انجام‌شده به کمک شبیه‌سازی سه‌بعدی، به تأثیر عوامل مختلف بر آثار سه‌بعدی امواج پرداخته شده است [3-14]. این عوامل شامل محل گیرنده، فرکانس موج ورودی، شعاع چکش، شعاع شمع و نسبت شعاع چکش به شعاع شمع است. چای و فون [3] به عنوان یک راه‌حل، به استفاده از امواج منعکس‌شده از نوک شمع و مجدداً منعکس‌شده از سر شمع اشاره کرده‌اند. چای و همکاران [4] روشی برای تفکیک اثر مقاومت خاک و اثر امپدانس شمع ارائه دادند. یان هنگ هوانگ و همکاران [5] به مطالعه قابلیت روش پژواک صدا (sonic echo) در تعیین مکان نقص‌ها و همچنین کمترین اندازه قابل تخمین نقص‌ها در یک شمع درجاریز پرداختند. چای و همکاران [6] پدیده انعکاس‌های چندگانه را به علت وجود امواج ریلی و بررسی نسبت مشخصه‌ی طول‌موج محرک فشاری مطالعه کردند. چو و همکاران [7] بیان کردند که با مدل‌سازی سه بعدی حرکت موج در یک شمع سالم، یک سرعت منفی در موج بلافاصله پس از اولین بیشینه سرعت نمایان می‌شود. این مطالعات، در ادامه پژوهشگرانی مانند

استیناخ و وی [8]، اسمیت و چو [9]، فوکوهارا و همکاران [10] و لیائو و روست [11] انجام شده است. جیانگ و همکاران [12] یک مدل محاسباتی سه‌بعدی برای ارتعاش گذرا در مجموعه شمع، سر شمع و خاک ارائه کردند. چنگ جی ژنگ و همکاران [13] به اثر سه بعدی امواج ناشی از ضربه بر انتشار امواج در شمع تأکید کردند. ژنگ و همکاران [14] پاسخ دینامیکی غیرمقارن یک شمع تحت یک نیروی اعمال شده در یک نقطه اختیاری روی سر شمع را مورد بررسی قرار دادند. لیو و همکاران [15] با مدسازی آزمایش به صورت مقارن محوری به بررسی اثر واکنش‌های دو طرفه (عمودی و شعاعی) بدنه شمع و غیر یکنواختی تحریک در بالای شمع پرداختند. مطالعات لیو و همکاران مبنایی برای تفسیر دقیق PIT شمع‌های با قطر بزرگ با ضربه چکش غیرعادی فراهم می‌کند [16]. پروتوپاداکیس و همکاران [17] به کمک ردیاب عصبی ژنتیکی بهینه شده به شناسایی عیوب ساختاری در شمع‌های بتنی پرداختند. لیو و شین [18] یک مدل تقریباً پیوسته جدید از برهمکنش لایه‌ای خاک-شمع (LSPI) در این مقاله توسعه دادند. در زمینه مطالعات آزمایشگاهی، وانگ [19] با ساخت شمع‌هایی به طول دو متر، به بررسی آزمایش یکپارچگی شمع پرداخت. در زمینه مطالعات میدانی، فخاریان و حسین زاده عطار [20] با انجام آزمایش PIT، طول شمع‌های بکاررفته در بندر امام خمینی را تخمین زدند. نی و همکاران [21] با کمک روش PIT اثر سختی چکش بر شکل امواج شمع‌های لاغر را مطالعه کردند. آنچه در تمامی این مطالعات نمایان است، دشواری تفسیر نتایج حاصل از امواج کسب شده است که از پیچیدگی‌های خاصی مانند برآورد مقدار خرابی و محدوده آن است. همچنین وجود بیش از یک نقص در طول شمع، ممکن است تفسیر نتایج را با مشکل روبرو کند.

در این پژوهش، به کمک شبیه‌سازی عددی سه بعدی به مطالعه بررسی عوامل مؤثر بر تفسیر نتایج آزمایش یکپارچگی شمع پرداخته می‌شود. مطابق تحقیقات محققان پیشین [3-14]، استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی به نتایج دقیق‌تری می‌انجامد. هدف از این مطالعه، بررسی اثر وجود یک نقص در طول یک شمع استوانه‌ای بر شکل امواج است. مکان و اندازه

که در آن، ρ چگالی شمع است. استفاده از نظریه امواج یک‌بعدی باعث ایجاد مشکلاتی مانند عدم در نظر گرفتن نوسانات چندگانه [3] و سرعت منفی پس از اولین بیشینه سرعت [7] در شکل موج می‌شود. برای رفع این مشکلات، از شبیه‌سازی سه بعدی استفاده می‌شود [3-14]، رابطه ساده شده پخش موج در فضای سه بعدی عبارت است از:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i$$

که در آن u_i تغییر مکان در راستای i ام $(i=1,2,3)$ ، $\bar{\epsilon} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$ کرنش حجمی x_i محور مختصات در فضای سه بعدی (x,y,z) ، λ و μ ثوابت لامه^۱ و ∇^2 عملگر لاپلاسین است.

به منظور شبیه‌سازی عددی سه بعدی، از نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده و برای مطالعه عددی رفتار مکانیکی یک محیط سه بعدی پیوسته کاربرد دارد. در این مطالعه، آزمون PIT بر روی یک شمع سالم بدون حضور خاک و با وجود خاک شبیه سازی شده است. درستی شبیه‌سازی‌های عددی از دو طریق مختلف شامل مقایسه نتایج با نظریه پخش امواج یک بعدی و همچنین، یافتن محل بهینه گیرنده طبق نتایج پژوهش‌های دیگر انجام شده است. در ادامه، تاثیر عواملی مانند وجود نقص با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- هندسه مدل عددی و شبکه بندی

یک شمع با بدنه استوانه‌ای به قطر $D = 0.5 \text{ m}$ و طول $L = 10 \text{ m}$ متر که داخل خاک مدفون شده است، در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۱)، این شمع در داخل محیط خاکی مکعب مستطیل قرار داده می‌شود. ابعاد فضای خاک به گونه‌ای تعیین شد که مرزهای مدل عددی، روی جواب‌های مسئله نقشی نداشته باشد. با ساخت چندین مدل عددی و بررسی عدم تاثیر فاصله مرزها روی تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در محدوده هندسه مذکور و همچنین، هماهنگی مقدار

نقص‌ها در طول شمع متغیر در نظر گرفته شده است. با اعمال ضربه بر مرکز سر شمع و دریافت امواج، شکل امواج دریافتی برای کاربردی‌تر کردن آزمایش PIT تفسیر می‌شود.

۲- انتشار امواج و شبیه سازی عددی

آزمون PIT بر اساس نظریه پخش امواج یک‌بعدی و شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی تفسیر می‌شود. شکل رایج معادله موج در فضای یک‌بعدی به صورت زیر است [22]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (۱)$$

این رابطه توسط اسمیت [1] برای شرایط مرزی شمع کوبی به شکل زیر اصلاح شد:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial u}{\partial x} \right) \pm k \quad (۲)$$

در روابط فوق u جابه‌جایی، t زمان، x جهت انتشار موج، E مدول الاستیک شمع و k مقاومت در برابر راندن شمع است. اسمیت [1] معادلات پایه‌ای فوق را برای تحلیل عددی مسئله شمع کوبی ارائه کرد که بعدتر برای حل یک‌بعدی نیز به کار گرفته شد. امواج ایجاد شده در اثر اصابت ضربه چکش، در طول شمع حرکت کرده و با برخورد به نوک شمع منعکس شده و توسط گیرنده در سر شمع دریافت می‌شود. زمان این رفت و برگشت از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [23]:

$$t = \frac{2L}{C} \quad (۳)$$

که در آن، t زمان یک رفت و برگشت موج از سر شمع، L طول شمع و C سرعت موج در داخل شمع است. سرعت موج گذرنده از داخل شمع، با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (۴)$$

که در آن، C_0 سرعت عبور موج در شمع و f_{max} بیشترین فرکانس موج ورودی است. برای هر دو جسم خاک و شمع، از مدل رفتاری کشسان همسان‌گرد استفاده شده است که بررسی کارایی این مدل رفتاری، در بخش ۳-۲ تشریح شده است. پارامترهای شمع و خاک شامل پارامترهای رفتاری و هندسی در جدول (۱) ارائه شده است. با احتساب مدول الاستیک برابر با ۴۰۰۰۰ مگاپاسکال و چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع برای شمع که در جدول (۱) آورده شده است، سرعت انتشار موج در شمع با توجه به رابطه ۴، $c=4000\text{m/s}$ بدست می‌آید. با توجه به سرعت مذکور و با در نظر گرفتن ضربه به صورت یک موج نیمه سینوسی با مقدار فرکانس $f = 500\text{Hz}$ ، بیشترین طول المان برابر با 0.8 متر بدست می‌آید. در شبیه‌سازی عددی این مطالعه، بعد المان‌ها در جهت شعاع شمع در محدوده اعمال ضربه برابر با 10 میلی‌متر، در محدوده شمع بتنی برابر با 55 میلیمتر و در محدوده خاک 0.1 متر در نظر گرفته شده است. در راستای قائم، بعد همه المان‌ها برابر با 0.1 متر انتخاب شد. همه ابعاد انتخاب شده، از طول حداکثر المان (0.8 متر) کوچکتر هستند، پس شرایط ذکر شده را ارضا می‌نمایند.

جدول ۱. مشخصات شمع و خاک

Pile	Soil	Unit	Parameter
40000	250	MPa	Elastic Modulus
10	14	m	Length
0.5	4.5	m	Width/diameter
2500	1800	kg/m ³	Density
0.25	0.35	-	Poisson's ratio

Table 1. Properties of the soil and the pile

۲-۲- صفحه فصل مشترک خاک و شمع

در نرم‌افزار FLAC^{3D} سطوح فصل مشترک به صورت مجموعه‌ای از المان‌های مثلثی سه گرهی تعریف می‌شوند. مدل رفتاری صفحه فصل مشترک با معیار مقاومت برشی کولمب خطی تعریف می‌شود و نیرو توسط فنرهای برشی و قائم منتقل می‌شود. مطابق توصیه نرم‌افزار FLAC^{3D} [26]، سختی برشی (K_s) و عمودی (K_n) المان‌های متصل به یک صفحه فصل مشترک از رابطه زیر بدست می‌آید:

نشست شمع با روابط تحلیلی الاستیک، در نهایت، مرزهای محیط خاک از اطراف شمع به‌اندازه‌ی $4D$ و از نوک شمع به‌اندازه‌ی $8D$ به سمت پایین امتداد یافته شده است.

شکل ۱. هندسه شمع و خاک به صورت دوبعدی و سه بعدی

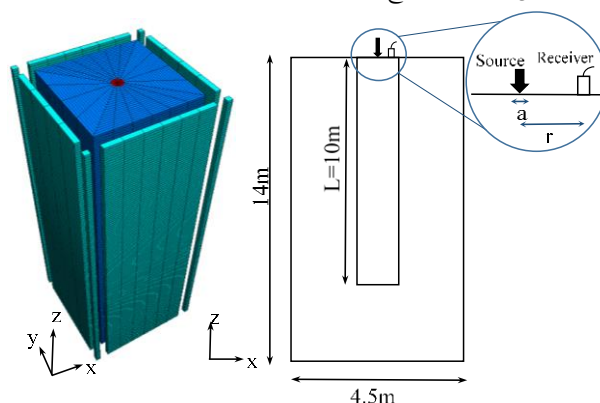


Fig. 1. The geometry of pile and soil around in the form of: two-dimensional and three-dimensional views

به منظور تدقیق شبیه‌سازی‌ها، مطابق شکل (۲)، از دو شبکه ریز و درشت در بدنه شمع استفاده شده است، به طوری که شبکه ریزتر در محل برخورد ضربه به قطر a در نظر گرفته شده است.

شکل ۲. نمایش شبکه بندی هندسه شمع و محل اعمال ضربه

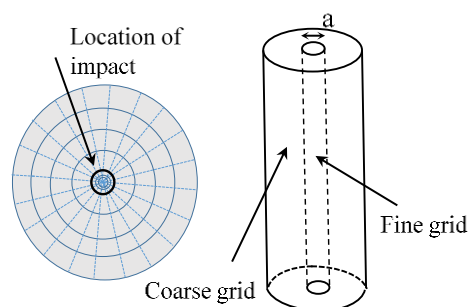


Fig. 2. Presentation of pile geometry and the numerical grids

بر اساس مطالعات کیولمیر و لیسمر [25] برای درستی در شبیه‌سازی پخش امواج در یک مدل دینامیکی، طول هر المان به اندازه کمتر از یک‌دهم طول موج ورودی (λ) محدود شده است. طول موج از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$\lambda = \frac{C_0}{f_{max}} \quad (5)$$

$$f(t) = 0 \quad t \geq T \quad \text{و} \quad f(t) = Q \sin\left[\left(\frac{\pi}{T}\right)t\right] \quad t \leq T \quad \text{ا)} \quad (7)$$

که در آن Q ، مقدار دامنه تنش ناشی از ضربه ورودی، t زمان بارگذاری و T مدت زمان ضربه است [27]. در این مطالعه، $Q=6\text{KN}$ و $T=2\text{ms}$ انتخاب شده‌اند.

۲-۴- مدل رفتاری خاک و شمع

آزمون PIT به عنوان یک آزمون کرنش کوچک شناخته می‌شود [23]. بر اثر بارگذاری تعریف شده، تغییرات کرنش طولی در راستای شمع و همچنین کرنش قائم در نقطه‌ای زیر نوک شمع بررسی شد و بیشینه کرنش این نقاط به ترتیب برابر $\gamma = 2.4 \times 10^{-12}$ و $\gamma = 7.4 \times 10^{-13}$ بدست آمده است. با توجه به کوچکی کرنش ایجاد شده (خیلی کمتر از 10^{-5})، می‌توان گفت ماده خاک در محدوده رفتار کشسان بوده [28] و می‌توان از مدل کشسان همسانگرد در خاک استفاده نمود. از طرف دیگر، طبق نظر چن و سالیب [29]، رفتار بتن در مقاومت فشاری کوچکتر از $0.3f'_c$ به صورت کشسان است. با فرض $f'_c = 25 \text{ MPa}$ و محاسبه آستانه کرنش خمیری بتن برابر با 0.000319 مطابق آیین نامه آبا [30]، استفاده از مدل کشسان برای شمع بتنی نیز قابل قبول است.

۲-۵- میرایی

در یک تحلیل دینامیکی میرایی را می‌توان به دو دسته میرایی ذاتی و میرایی مکانیکی تقسیم بندی کرد. از آنجا که در این پژوهش کرنش‌ها در محدوده رفتار الاستیک است از این میرایی ذاتی مصالح یا همان میرایی هیستریزس صرف‌نظر می‌شود. میرایی رایلی متداول‌ترین نوع میرایی مکانیکی است که در این پژوهش به کار گرفته شده است. میرایی رایلی یک میرایی مستقل از فرکانس در بازه وسیعی از فرکانس‌ها است. این میرایی به وسیله آزمون و خطا و بررسی شکل امواج به میزان 0.5% انتخاب شد. نوع دیگر میرایی، میرایی تشعشعی یا هندسی است که عامل اتلاف انرژی در اثر پخش امواج از منبع اعمال ضربه به محیط نیمه بی نهایت خاک است.

$$K_s = K_n = \max \left[\frac{\left(K + \frac{4}{3}G \right)}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (7)$$

که در این رابطه، K و G به ترتیب مدول بالک و مدول برشی مصالح مجاور صفحه فصل مشترک بوده و $\Delta Z_{\min}$ کمترین بعد المان‌های متصل به فصل مشترک است که در این پژوهش این مقدار 0.1 متر می‌باشد. مدول برشی (G) و مدول بالک (K) بر اساس مدل الاستیک (E) و نسبت پواسون (ν) به صورت $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ و $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ بدست می‌آید. با توجه به هندسه مدل و پارامترهای مصالح و همچنین فرآیند آزمون و خطا برای رسیدن به یک شکل موج قابل قبول در توده خاک و شمع، سختی برشی و عمودی فصل مشترک برابر با $K_s = K_n = 10^9 \text{ Pa/m}$ در نظر گرفته شد.

۲-۳- شرایط مرزی و شرایط اولیه

این پژوهش در دو مرحله انجام گرفته است. در مرحله اول، مولفه‌های تنش محیط در شرایط استاتیکی به حالت تعادل می‌رسد و در مرحله دوم، با اعمال امواج رفت و برگشت بار در طول شمع در شرایط دینامیکی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. شرایط مرزی برای این دو مرحله متمایز در نظر گرفته می‌شود که در هر کدام، شرایط مرزی مختص به خود تعریف شده است. در شرایط استاتیکی، مرز پایین بطور کامل بسته شده و مرزهای جانبی فقط می‌توانند در راستای قائم حرکت کنند. در شرایط دینامیکی، از مرز میدان آزاد برای صفحات جانبی مدل استفاده شده است که موجب کاهش زمان محاسبات می‌شود. این مرزها توسط میراگرهای ویسکوز به مرزهای اصلی مدل متصل شده و از انعکاس مجدد امواج به داخل مدل جلوگیری کرده و موجب جذب امواج می‌شود.

بار ضربه‌ای به صورت یک موج نیمه سینوسی از جنس تنش فشاری در مرکز شمع و در منطقه دایروی به قطر $a = 60\text{mm}$ اعمال می‌شود و رابطه آن به صورت زیر است:

۲-۶- صحت سنجی مدل عددی

برای درستی آزمایی شبیه‌سازی آزمون PIT، از دو رویکرد مختلف استفاده شده است. در رویکرد اول، از بررسی شکل موج پخش شده در طول بدنه شمع استفاده می‌شود و در رویکرد دوم، به تاثیر پارامترهای سه بعدی امواج و هماهنگی با نتایج کارهای دیگران در ادبیات فنی پرداخته می‌شود.

شکل ۳. نمودار تغییرات سرعت بی بعد شده نسبت به زمان انتشار موج در

شمع‌های آزاد و مدفون در خاک

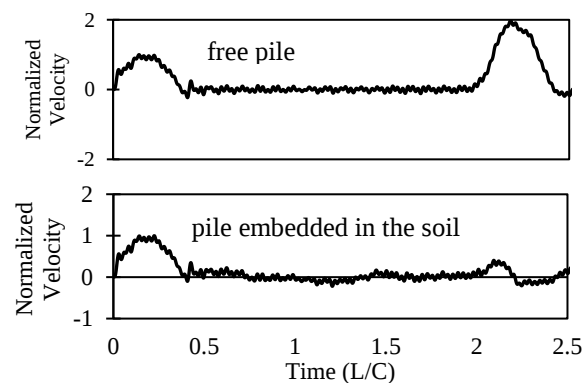


Fig. 3. The diagram of dimensionless velocity changes versus wave propagation time in free and embedded piles

طبق نظریه پخش امواج در محیط یک بعدی شمع، وجود خاک می‌تواند شکل موج بوجود آمده طول شمع را تغییر دهد. در این پژوهش، اعمال ضربه روی یک شمع تنها و یک شمع مدفون در خاک انجام شده است و نتایج شکل موج‌های دریافتی در سر شمع مطابق شکل (۳) است. محور قائم نشان دهنده سرعت موج داخل شمع است که نسبت به بیشینه سرعت اولیه بی بعد شده است. محور افقی، زمان انتشار موج در طول شمع بوده که برحسب نسبت طول شمع به سرعت انتشار موج در شمع (L/C) تبدیل شده است. در این نمودارها دو نقطه بیشینه (قله) مشاهده می‌شود. قله اول نشان‌دهنده اعمال ضربه بر سر شمع و قله دوم نشان‌دهنده موج منعکس شده از نوک شمع است. در شمع آزاد، به دلیل برگشت تمام موج به داخل بدنه شمع قله دوم مقدار بزرگتر و برابر با دو برابر قله اول است. این پدیده بر اساس حل معادله موج در فضای یک بعدی برای یک میله سر آزاد اثبات می‌شود [31]. همچنین، در مراجع مختلف دیگر، این پدیده اشاره شده است [32-36]. این درحالی است که برای

شمع مدفون در خاک و در تماس مستقیم با خاک و به علت میرایی، قله دوم همواره کوچک‌تر از قله اول است. نکته دیگر، محل وقوع قله دوم است، بدین صورت که مطابق استاندارد ASTM D5882-07 [23]، قله دوم باید در زمان $2L/C$ رخ دهد. وجود این هماهنگی، نشان از درستی شبیه‌سازی عددی است.

به عنوان رویکرد دوم، به بررسی فاصله نصب گیرنده در شمع پرداخت شده است. بهترین مکان نصب گیرنده موج در آزمون PIT در مطالعات گذشته بررسی شده و مشاهده شده است که مکان گیرنده تاثیر بسزایی در کاهش پارامترهای سه بعدی موج نظیر مقدار دامنه نوسانات [3] و سرعت منفی ایجاد شده پس از اولین قله [7] دارد و می‌تواند منجر به تفسیر نادرستی از سلامت و یکپارچگی شمع شود. برای بررسی درستی شبیه‌سازی‌ها در پژوهش حاضر، تغییرات موج بازگشتی در طول زمان برای سه نقطه مختلف از سر شمع به شعاع R با فاصله افقی $0.4R$ ، $0.6R$ و $0.8R$ از مرکز شمع برداشت شده و نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است. مقدار منفی سرعت مشاهده شده پس از اولین قله، نشان دهنده رفتار پخش سه‌بعدی امواج در داخل شمع است. مشاهده می‌شود دامنه این قله برای برداشت موج در فاصله $r = 0.6R$ کمینه شده که این نتیجه با نتایج چو و همکاران [7] هماهنگی دارد. همچنین، دامنه نوسانات در فاصله مشابه کمترین مقدار را دارد که در مرجع [3] به آن اشاره شده است. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت بهترین محل قرارگیری گیرنده برای استفاده از تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی برابر با $r=0.6R$ است.

۳- شبیه‌سازی وجود نقص در بدنه شمع

در شمع‌های بتنی درجاریز، عدم یکپارچگی در بدنه شمع می‌تواند بوجود آید. در حین انجام عملیات بتن‌ریزی، ممکن است بتن درجا به دلایلی مانند تمرکز آرماتورهای پیرامونی به همه سطح مقطع شمع به ویژه در پیرامون آرماتورها نرسیده و سطح مقطع شمع کمتر از مقدار طراحی شده باشد که به این نقص، «باریک شدگی» یا necking گویند. از طرفی، ممکن

برابر با ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ در نظر گرفته شده است. طول نقص‌ها برابر با ۰/۶ متر، ۱ متر، ۲ متر و ۴ متر انتخاب شده اند.

شکل ۵. هندسه شمع با یک نقص در مکان های $L/3$ ، $L/2$ و $2L/3$ از سر شمع (به صورت الف) باریک شدگی (ب) برآمدگی

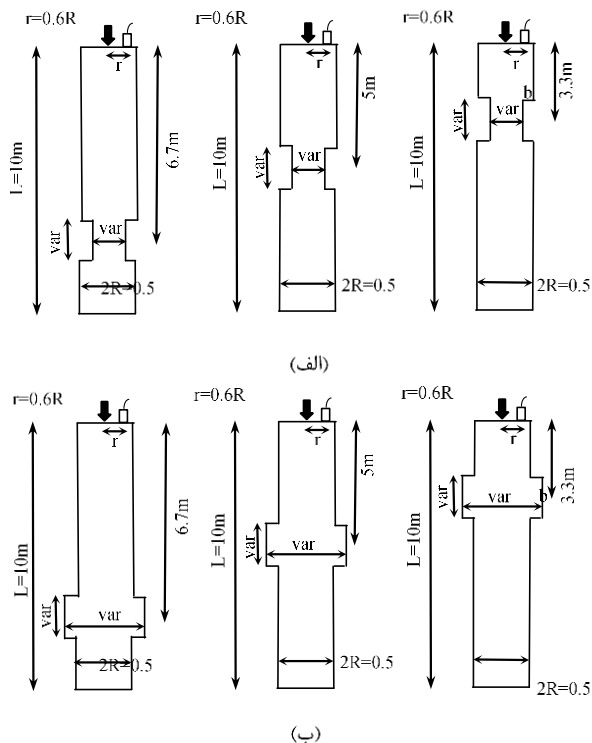


Fig. 5. Pile geometry with an anomaly at $L/3$, $L/2$ and $2L/3$ locations from the pile head as: a) necking, b) bulging

۴- بحث و بررسی نتایج

ابعاد نقص می‌تواند بر شکل امواج و دامنه قله‌ها اثرگذار باشد. در ضمن محل قرارگیری نقص می‌تواند بر زمان رسیدن امواج از نوک شمع تأثیرگذار باشد. در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با هندسه‌های مختلف بررسی شده است.

تغییرات سرعت بی‌بعد شده در طول شمع بر حسب زمان (L/C) مطابق شکل (۶) نمایش داده شده است. دو قله میانی به غیر از قله‌های ابتدایی و انتهایی ایجاد می‌شود. یادآوری می‌شود که قله ابتدایی نشانگر ضربه اعمال شده به سر شمع و قله انتهایی نشان‌دهنده امواج منعکس‌شده از نوک شمع است و طول شمع را می‌توان با استفاده از زمان رسیدن به این قله محاسبه نمود. زمان متناظر با شروع اولین قله میانی، نشان‌دهنده

است به علت ریزش گمانه در برخی از اعماق چاه حفرشده، سطح مقطع شمع بزرگتر از سطح مقطع طراحی شود که منجر به ایجاد «برآمدگی» یا bulging در بدنه شمع می‌شود. در صورت انجام آزمون PIT، می‌توان این نقصان‌ها را شناسایی کرده و در صورت نیاز، تمهیداتی اندیشیده شود.

شکل ۴. مقایسه نمودار سرعت-زمان برای سه حالت قرارگیری گیرنده در فواصل ۰.۴R، ۰.۶R و ۰.۸R از مرکز شمع

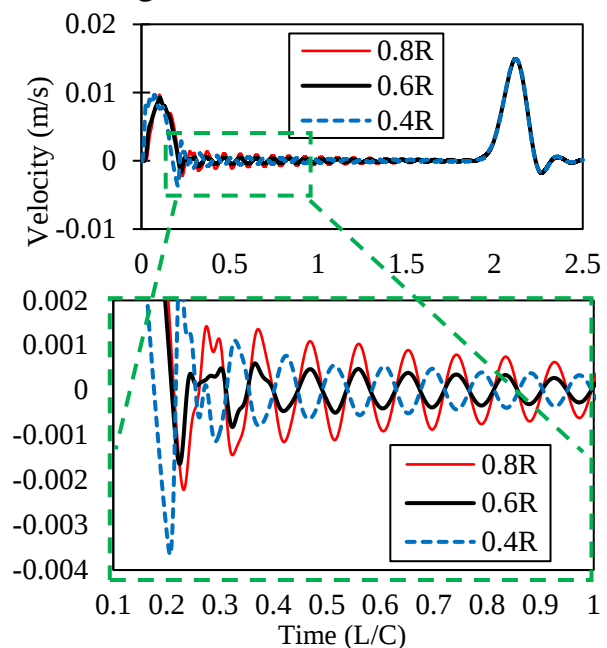


Fig. 4. Comparison of the velocity-time diagrams for three positions of the receiver at distances of 0.4R, 0.6R and 0.8R from the center of the pile

به منظور مطالعه عددی آزمون PIT و تأثیرپذیری حضور نقص در بدنه شمع، در مجموع، از ۱۰۰ شبیه‌سازی عددی در این پژوهش استفاده شده و حضور یک نقص به صورت باریک شدگی یا برآمدگی در محل‌های مختلف شمع و با ابعاد مختلف (ضخامت و طول) در نظر گرفته شده و به تفسیر نتایج آزمون PIT آنها پرداخته شده است. بررسی حضور دو نقص در طول شمع تأثیرگذاری آن بر نتایج آزمون PIT در مرجع [37] ارائه شده است. در شکل (۵)، جزییات هندسی شمع با یک برآمدگی و یک باریک‌شدگی را نشان می‌دهد. مرکز این نقص‌ها در سه محل $L/3$ ، $L/2$ و $2L/3$ از بالای شمع، در نظر گرفته شده‌اند. نسبت ضخامت خرابی شمع (b) به شعاع شمع، درصد خرابی نام گرفته است. در این پژوهش، درصد خرابی

صورت اندازه‌گیری دامنه قله‌های میانی از خط صفر اولیه این مقادیر مشابه حالت شمع در تماس با هوا با هم برابر نبوده و اختلاف زیادی داشته باشد و نیز، باعث پراکندگی داده‌ها و غیر قابل مقایسه شدن آنها می‌شود. به همین دلیل، توصیه می‌شود دامنه قله‌های میانی از خط صفر جابه‌جا شده اندازه‌گیری شوند. شکل (۷ ب) مقادیر اصلاح شده و اصلاح نشده دامنه قله‌های اول و دوم میانی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود مقادیر قله‌های اول و دوم در حالت اصلاح نشده اختلاف زیادی دارند در حالیکه این مقادیر برای حالت اصلاح شده برابر است.

شکل ۷. مقایسه مقادیر خام و اصلاح شده دامنه موج و سرعت بی بعد شده در شمع با یک نقص باریک شدگی به طول ۱ متر و درصد خرابی ۲۰٪ در محل $L/3$

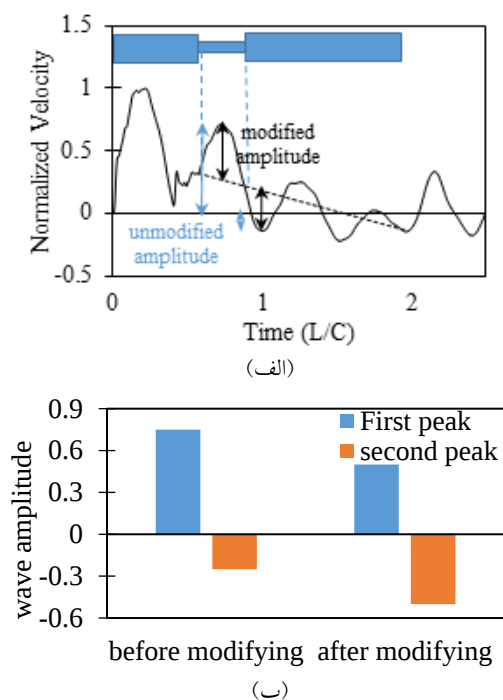


Fig. 7. Comparison of raw and modified wave amplitude and normalized velocity-time diagram for an embedded pile with a necking length of 1 meter and an anomaly percentage of 20% at $L/3$ location

۴-۱- تأثیر درصد خرابی بر دامنه‌ی قله‌های اول و دوم نقص

مقدار دامنه قله میانی اول و دوم در موج‌های حاصل شمع‌ها با درصد خرابی‌های مختلف با طول یک متر و در مکان‌های مختلف از سر شمع به صورت آزاد و مدفون در خاک در شکل

محل شروع نقص بوده و قله دوم میانی نشان‌دهنده محل پایان نقص است. در صورت وجود باریک شدگی، برای اولین قله میانی مثبت و جهت دومین قله میانی منفی خواهد بود و در صورت وجود برآمدگی برعکس این حالت، اتفاق می‌افتد

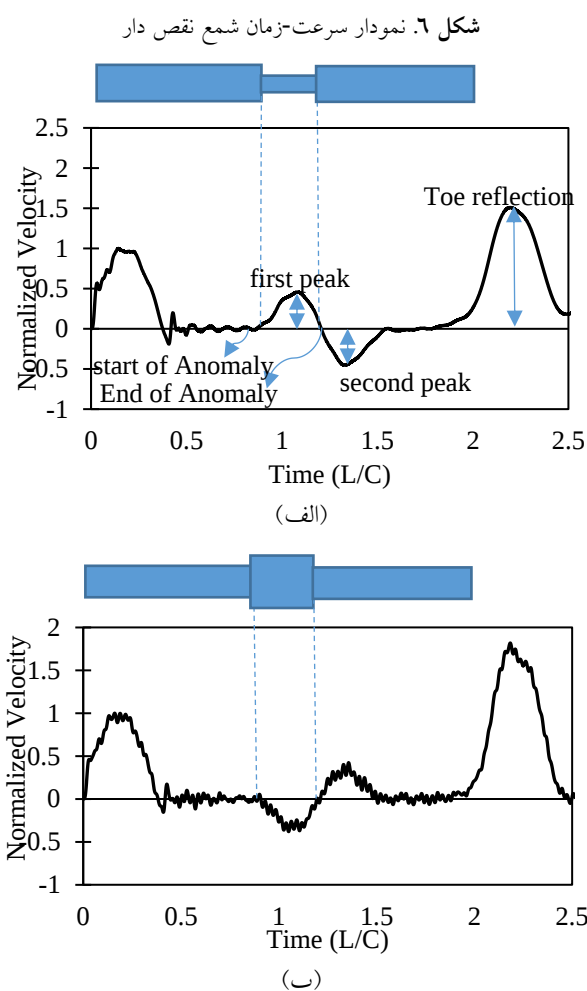


Fig. 6. Velocity-time diagram of a pile with an anomaly

وجود خاک باعث انحراف شکل موج نسبت به حالت بدون خاک می‌شود. موج حاصل از ضربه در داخل یک شمع مدفون در خاک در شکل (۷ الف) نمایش داده شده است. نقص باریک شدگی در فاصله $L/3$ از سر شمع قرار گرفته است. مشابه حالت قبل، دو قله میانی در مکان‌های شروع و خاتمه نقص مشاهده می‌شود. با این تفاوت که مسیر موج به صورت مستقیم نبوده، بلکه به صورت مایل نمود پیدا کرده است. این پدیده در مطالعه شبیه سازی آزمون PIT توسط چای و همکاران [4] نیز اشاره شده است. این پدیده موجب می‌شود در

باریک شدگی، دو عامل برهم‌نهی امواج فشاری منعکس شده از نوک شمع و امواج کششی انتهای باریک شدگی و همچنین میرایی، باعث کاهش ارتفاع قله دوم میانی می‌شود. بنابراین، در هر دو حالت شمع مدفون و شمع در تماس با هوا، همواره دامنه قله میانی دوم از قله میانی اول کوچک‌تر است.

شکل ۸. نمودار دامنه‌ی قله نقص اصلاح شده در برابر درصد خرابی برای یک نقص در محل‌های متفاوت

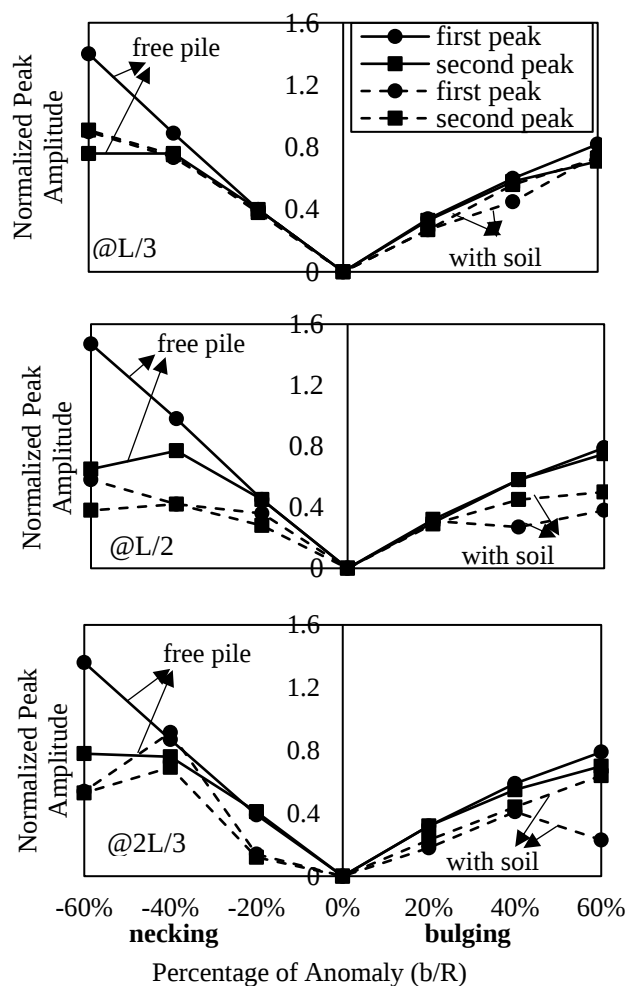


Fig. 8. Diagram of modified peak amplitude of anomaly versus percentage of anomaly for an anomaly at different locations

۲-۴- برهم‌کنش امواج

ضربه وارد بر سر شمع به صورت تنش فشاری بوده و این ضربه در نمودار سرعت-زمان به صورت یک قله در جهت مثبت نمایان می‌شود و برعکس، قله‌های منفی ایجاد شده در نمودار نشان از امواج کششی دارند. همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، دومین قله میانی در باریک شدگی، منفی بوده

(۸) نشان داده شده است. نقص‌های برآمدگی و باریک شدگی به ترتیب با درصد خرابی مثبت و منفی مشخص شده‌اند. برای شمع‌های در تماس مستقیم با هوا، مشاهده می‌شود که تغییرات دامنه قله میانی اول در مقابل درصد خرابی یک روند خطی دارد. شیب این خط در حالت باریک شدگی (با درصد منفی) بیشتر از حالت برآمدگی (با درصد مثبت) است. بطور مشابه، تغییرات قله میانی دوم روند تقریباً خطی دارد. ولی مشاهده می‌شود که در درصد خرابی ۶۰٪ (به ویژه برای حالت باریک شدگی)، اختلاف زیادی با قله میانی اول پیدا می‌کند. دلیل این انحراف میان دو قله میانی را می‌توان به دو علت مرتبط دانست. علت اول می‌تواند بخاطر تداخل امواج فشاری منعکس شده از نوک شمع با امواج کششی منعکس شده از انتهای باریک شدگی باشد که هرچه درصد خرابی بیشتر باشد، این تداخل بیشتر بوده و در نتیجه، این انحراف بیشتر می‌شود. از این رو، بر اساس این مشاهده، توصیه می‌شود برای تخمین مقدار خرابی با آزمایش PIT، بهتر است از قله میانی اول استفاده شود. دومین علت می‌تواند بخاطر میرا شدن امواج عبوری از هندسه تغییر یافته شمع (مکان نقص) باشد. به دلیل وجود همین میرایی در حالت برآمدگی با وجود برهم‌نهی دو موج فشاری، قله دوم اندکی از قله اول کوچک‌تر است. در حالتی که شمع داخل خاک مدفون است، شیب تغییرات قله‌های میانی با درصد خرابی، کاهش یافته و لزوماً این تغییرات به صورت خطی نیست. همچنین، انحراف قله دوم میانی از قله اول میانی در تمام موارد به غیر از $L/3$ مشاهده می‌شود. دلیل عدم این انحراف را می‌توان اینگونه توجیه نمود که با قرار گیری نقص در نزدیکی سر شمع، از یک طرف، قدرت موج بیشتر بوده (و میرایی کمتر است) و از طرف دیگر، اثر برهم‌نهی امواج منعکس شده از نقص با امواج منعکس شده از نوک شمع کمتر است. در شمع مدفون در خاک مشابه حالت آزاد در هوا و وجود باریک شدگی، قله میانی اول بزرگ‌تر از قله میانی دوم است. اما در حالت برآمدگی، این روند برعکس است. دلیل این پدیده این است که در حالت شمع مدفون، برهم‌نهی امواج فشاری نوک شمع و امواج فشاری انتهای برآمدگی بر میرایی موجود غلبه کرده و باعث افزایش دامنه‌ی قله دوم می‌شود. برای حالت

افزایش طول نقص تا حدود طول یک متر، دامنه قله افزایش یافته و سپس، به یک مقدار ثابتی می‌رسد. نکته دیگر، بزرگتر بودن دامنه موج در نقص باریک شدگی نسبت به برآمدگی است. همچنین، مقدار دامنه برای شمع‌های در تماس با هوا همواره بیشتر از شمع‌های مدفون در خاک بوده که ناشی از میرایی ناشی از وجود خاک اطراف شمع است. مشاهده دیگری که می‌توان در بحث کاربرد آزمون PIT از آن استفاده نمود، تأثیرپذیری بزرگی دامنه اولین موج برای شمع‌های مدفون در خاک است، به طوری که برای نقص باریک شدگی، دامنه قله با افزایش عمق مدفون شدگی کاهش می‌یابد؛ در صورتی که برای نقص برآمدگی، این دامنه تقریباً ثابت بوده و تابعی از محل قرارگیری نقص نسبت به سر شمع نیست. دلیل مشاهده این گونه رفتار را می‌توان در وجود میرایی هندسی و تداخل امواج دانست که شرح آن در بخش قبلی از نظر گذشت.

دو عامل میرایی هندسی و تداخل امواج منعکس شده از نوک شمع با امواج منعکس شده از انتهای نقص، بر تغییرات ارتفاع قله اثر می‌گذارد. برای شمع دارای باریک شدگی تداخل امواج فشاری منعکس شده از نوک شمع و امواج کششی منعکس شده از انتهای نقص باعث کاهش ارتفاع قله می‌شود و برای شمع دارای برآمدگی تداخل امواج فشاری منعکس شده از نوک شمع و امواج فشاری منعکس شده از انتهای شمع باعث افزایش ارتفاع قله می‌شود. وجود میرایی برای هر دو نقص باریک شدگی و برآمدگی باعث کاهش ارتفاع قله می‌شود. در شمع دارای باریک شدگی هر دو عامل باعث کاهش ارتفاع می‌شود در حالی که برای شمع دارای برآمدگی یک عامل باعث کاهش ارتفاع و عامل دیگر باعث افزایش ارتفاع می‌شود. بنابراین در برآمدگی این دو عامل همدیگر را خنثی می‌کنند در حالی که در باریک شدگی هر دو عامل باعث کاهش ارتفاع قله می‌شود. مقدار کاهش ارتفاع دقیقاً به محل نقص بستگی دارد بدیهی است که هر چه نقص به پایین شمع نزدیک‌تر باشد عامل میرایی بیشتر شده و در نتیجه این کاهش ارتفاع قله بیشتر می‌گردد.

(کششی) و دومین قله برآمدگی مثبت (فشاری) است پس، برآیند این دو باعث تضعیف امواج منعکس شده از انتهای نقص می‌شود. دومین قله میانی برآمدگی مثبت و فشاری است. از این رو، برآیند این موج و موج منعکس شده از نوک شمع که هر دو فشاری هستند، در جهت تقویت امواج منعکس شده از انتهای نقص عمل می‌کنند. البته این تنها عامل اثرگذار بر بزرگی دامنه امواج انعکاسی نیست. میرایی هندسی امواج با دور شد از منبع ضربه نیز بر این مقدار اثر می‌گذارد.

شکل ۹. برهمکنش امواج در شمع دارای یک نقص الف) باریک شدگی ب) برآمدگی

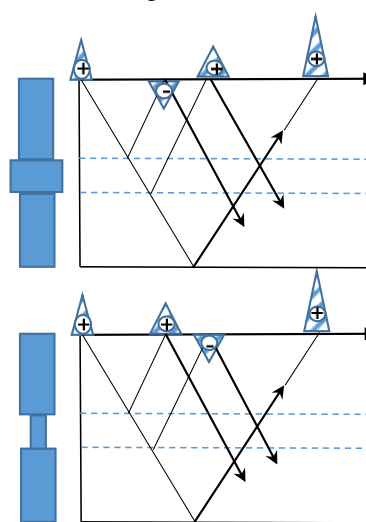


Fig. 9. The interaction of waves in a pile with an anomaly of: a) necking b) bulging

۳-۴- تأثیر طول نقص بر دامنه اولین قله میانی

یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر دامنه اولین قله میانی، طول نقص شمع است. با تمرکز بر درصد خرابی ۲۰٪، طول‌های مختلف نقص برابر با ۰.۶، ۱، ۲، و ۴ متر در نظر گرفته شده است. مکان این نقص‌ها در عمق‌های $L/3$ ، $L/2$ ، و $2L/3$ است. برای هر دو شرایط باریک شدگی و برآمدگی لحاظ شده است. تغییرات دامنه بی بعد شده اولین قله میانی در مقابل طول نقص برای دو حالت شمع مدفون در خاک و شمع در تماس با هوا و برای نقص‌های باریک شدگی و برآمدگی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. صرف نظر از نوع نقص، مشاهده می‌شود که با

تماس با هوا، می توان گفت مدفون شدگی شمع تاثیری در تغییر زمان ندارد.

شکل ۱۱. نمودار زمان رسیدن امواج نوک شمع در برابر درصد خرابی برای

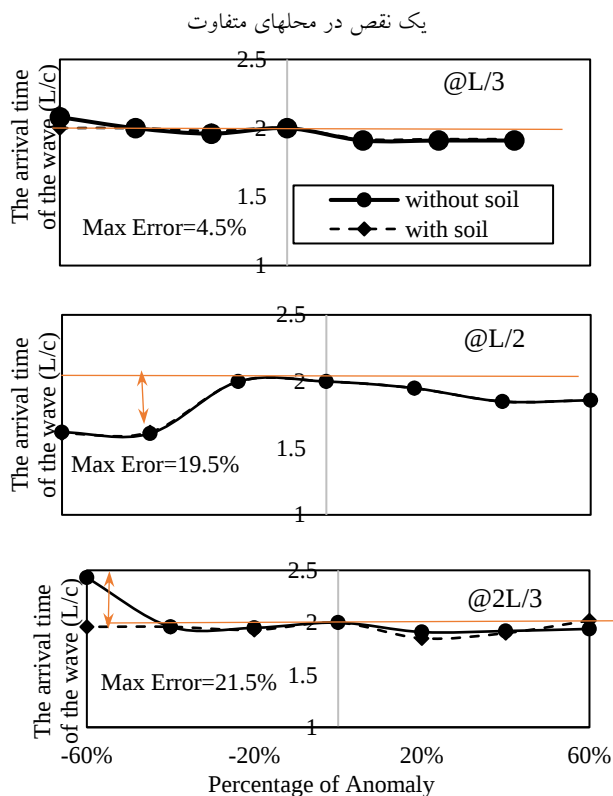


Fig.11. The diagram of the arrival time of the waves at the pile tip versus percentage of anomaly for an anomaly located at different place

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، به شبیه سازی عددی آزمایش یکپارچگی شمع (PIT) پرداخته شد. در این آزمون، با اعمال یک ضربه چکش به سر شمع و دریافت آن توسط گیرنده، شکل امواج توزیع شده در شمع ثبت شده و با تفسیر شکل امواج، می توان به موقعیت، ابعاد و شکل نقص در طول بدنه شمع پی برد. شبیه سازی عددی به صورت سه بعدی انجام گرفت. پس از درستی آزمای نتایج شبیه سازی یک شمع سالم، به مطالعه وجود یک نقص در طول شمع پرداخته شد. در این پژوهش، نشان داده شد که با کمک روش اختلاف محدود، می توان انتشار امواج در محیط پیوسته و تاثیرپذیری از وجود نقص را با

شکل ۱۰. نمودار دامنه ی قله اول در برابر طول نقص واقع شده در

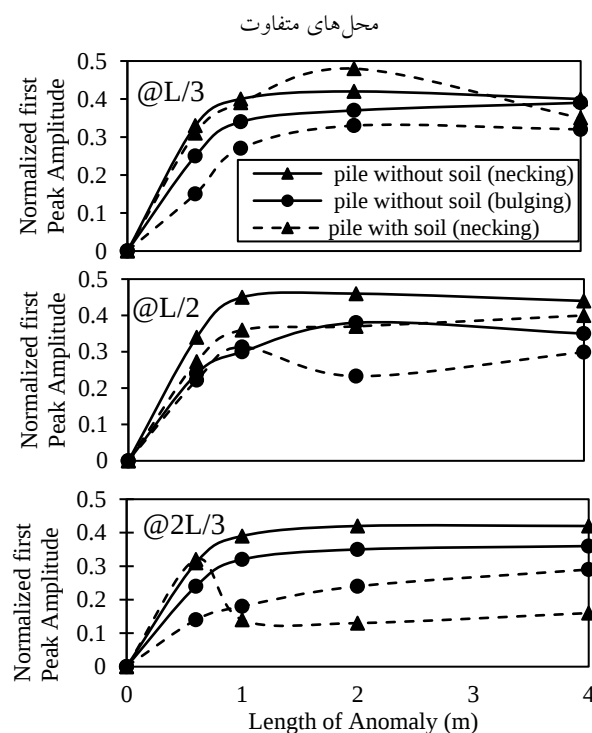


Fig. 10. The diagram of the amplitude of the first peak versus of an anomaly at different locations

۴-۴- تأثیر وجود نقص بر زمان موج بازتابی از نوک شمع

وجود نقص در طول شمع ممکن است باعث تغییر زمان رسیدن امواج بازتابی از نوک شمع به گیرنده مستقر در سر شمع شود. این امواج در شمع بدون نقص در مدت زمان دو برابر نسبت طول شمع به سرعت موج انتشاری (L/C) ثبت می شوند. ولی در صورت وجود نقص، این زمان ممکن است تغییر کند. شکل (۱۱) نشان دهنده تأثیر وجود نقص در عمق های مختلف بر زمان رسیدن امواج بازتابی از نوک شمع است. در صورتی که درصد خرابی (برای باریک شدگی و برآمدگی) کمتر از ۲۰٪ باشد، تغییر در زمان رسیدن امواج از نوک شمع ناچیز است. هرچه نقص از محل ضربه دورتر بوده و به نوک شمع نزدیک تر باشد، این اختلاف بیشتر می شود. این اختلاف برای نقص مستقر در $L/3$ برابر با ۴.۵ درصد بوده و در عمق $2L/3$ برابر با ۲۱.۵ درصد بدست آمده است. برای بررسی تاثیر شکل نقص، مشاهده می شود که برخلاف برآمدگی، نقص باریک شدگی تاثیر بسزایی در تغییر زمان رسیدن موج دارد. از مقایسه حالت های شمع مدفون و در

5. Huang, Y.-H., et al., *Assessment of identifiable defect size in a drilled shaft using sonic echo method: Numerical simulation*. Computers and geotechnics, 2010. **37**(6): p. 768-757.
 6. Chai, H.-Y., et al., *Effects of the Source on Wave Propagation in Pile Integrity testing*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2010. **136**(9): p. 1200-1208.
 7. Chow, Y.K., et al., *Low strain integrity testing of piles: three-dimensional effects*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2003. **129**(11): p. 1057-1062.
 8. Steinbach, J. and E. Vey, *Caisson evaluation by stress wave propagation method*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1975. **101**: p. 361-378.
 9. Smith, I. and Y. Chow. *Three dimensional analysis of pile drivability*. in *Proc. 2nd Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Piling, Austin, Texas*. 1982.
 10. Fukuhara, T., M. Kakurai, and M. Sugimoto. *Analytical evaluation of defective piles*. in *Proceedings of the 4th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. 1992.
 11. Liao, S.T. and J.M. Roesset, *Dynamic response of intact piles to impulse loads*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997. **21**(4): p. 255-275.
 12. Jiang, J., et al., *A study on low strain integrity testing of platform-pile system using staggered grid finite difference method*. Soil dynamics and earthquake engineering, 2014. **67**: p. 345-352.
 13. Zheng, C., et al., *Three-dimensional effects in low-strain integrity testing of piles: analytical solution*. Canadian geotechnical Journal, 2015. **53**(2): p. 225-235.
 14. Zheng, c., et al., *Non-axisymmetric response of piles in low-strain integrity testing*. Géotechnique, 2016. **67**(2): p. 181-186.
 15. Liu, X., et al., *Theoretical analysis of three-dimensional effect in pile integrity test*. Computers and Geotechnics, 2020. **127**: p. 103765.
 16. Liu, X., et al., *A simplified non-axisymmetric pile-soil interaction model for pile integrity testing analysis*. Applied Mathematical Modelling, 2023. **119**: p. 137-155.
 17. Protopapadakis, E., et al., *A genetically optimized neural classifier applied to numerical pile integrity tests considering concrete piles*. Computers & Structures, 2016. **162**: p. 68-79.
 18. Liu, X., et al., *Dynamic analysis of layered soil-pile interaction based on the nearly continuous model*. Ocean Engineering, 2023. **279**: p. 114457.
 19. Wong, k.y., *Small strain sonic pile test-need for caution*. Ground engineering, 1995. **28**(9): p. 32-37.
 20. K., F. and A. I.H., *Appication of PIT in the estimation of pile lengths in posts 10 and 14 of Imam Khomeini Port*, in *Proceedings of 9th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS)*. 2010: Tehran, Iran.
- موفقیت شبیه سازی کرد. نتایج کلی این پژوهش به اختصار عبارتند از:
- بهترین موقعیت قرارگیری گیرنده موج در سر شمع برای کاهش آثار سه بعدی امواج، در فاصله ۰.۶ برابر شعاع شمع است.
 - از مقایسه نتایج حاصل از آزمون های PIT شمع های مدفون در خاک با آزاد در هوا، مشاهده می شود وجود خاک باعث کاهش دامنه قله نقص ها می شود.
 - به علت آثار برهم نهی امواج، دامنه ی قله دوم نقص شمع دارای باریک شدگی قرار گرفته در خاک کمتر از قله اول آن بوده و برای شمع دارای برآمدگی، برعکس این مسئله اتفاق می افتد. به همین علت در صورت وجود باریک شدگی، استفاده از قله اول و در صورت وجود برآمدگی، استفاده از قله دوم برای تخمین درصد خرابی از روی نمودار شمع بدون خاک که خطی است توصیه می شود.
 - هر چه نقص به سر شمع یا محل ضربه نزدیک تر باشد، نمودار شمع مدفون در خاک و شمع آزاد نزدیک تر شده و پاسخ ها قابل استنادتر است و هرچه نقص از محل ضربه دورتر باشد، نمودار غیر همگراتر شده و پاسخ ها از حالت خطی و بدون خاک فاصله می گیرد.
 - با افزایش طول نقص تا حدود دو برابر قطر شمع، ارتفاع قله تغییر می کند (در بیشتر موارد افزایش می یابد) و در طول های بزرگتر، تقریباً ثابت می ماند.
- ### مراجع:
1. Smith, E., *Pile-driving analysis by the wave equation*. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1960. **86**(4): p. 35-61.
 2. Lee, S.L., et al., *Rational wave equation Model for pile-driving analysis*. Geotech. Engrg, 1988: p. 306-325.
 3. Chai, H.-Y. and K.-K. Phoon, *Detection of Shallow Anomalies in Pile Integrity Testing*. International Journal of Geomechanics, 2013. **13**(5): p. 672-677.
 4. Chai, H.-Y., et al., *Some observations on the performance of the signal matching technique in assessment of pile integrity*. Journal of nondestructive evaluation, 2011. **30**(4): p. 246-258.

31. Chan, H.-F.C., *Non-Destructive Testing of Concrete Piles using the Sonic Echo and Transient Shock Methods*. 1987, University of Edinburgh.
32. Chow, Y., et al., *Low strain integrity testing of piles: Three-dimensional effects*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003. **129**(11): p. 1057-1062.
33. Davies, R., *A critical study of the Hopkinson pressure bar*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1948. **240**(821): p. 375-457.
34. Ding, X., et al., *Vertical dynamic response of a concrete filled steel tube due to transient impact load: analytical solution*. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2016. **16**(01): p. 1640014.
35. Fischer, J., et al., *Numerical simulation of low-strain integrity tests on model piles*, in *Numerical Methods in Geotechnical engineering*. 2010, CRC Press. p. 671-676.
36. Kolsky, H., *An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading*. Proceedings of the physical society. Section B, 1949. **62**(11): p. 676.
37. Mansoori, M., *Numerical simulation of pile integrity test (PIT)* 1398, Ferdowsi University of Mashhad.
21. Ni, S.-H., et al., *Low-strain integrity testing of drilled piles with high slenderness ratio*. Computers and geotechnics, 2006. **33**(6-7): p. 283-293.
22. Forehand, P.W. and J.L. Reese, *Pile driving analysis using the wave equation*. 1963, Princeton University.
23. D5882-07., A., *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*. 2007, American Society for Testing and Materials (ASTM International....
24. Cosic, M., B. Folic, and R. Folic, *Numerical simulation of the pile integrity test on defected piles*. Acta Geotechnica Slovenica, 2014. **11**(2): p. 5-19.
25. Kuhlemeyer, R.L. and L. J., *Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems* Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1 : (°) ۹۹ . ۹۷۳ p. 421-427.
26. Cundall, P., *FLAC 3D Manual: a computer program for fast Lagrangian analysis of continua (Version 4.0)*. Minneapolis, Minnesota, USA, 2008.
27. Ding, X., et al., *Wave propagation in a pipe pile for low-strain integrity testing* .Journal of Engineering Mechanics, 2011. **137**(9): p. 598-609.
28. Kokusho, T., Y. Yoshida, and Y. Esashi, *Dynamic properties of soft clay for wide strain range*. Soils and Foundations, 1982. **22**(4): p. 1-18.
29. Chen, W.-F. and A.F. Saleeb, *Constitutive equations for engineering materials: Elasticity and modeling*. 2013: Elsevier.
30. Iran, P.a.B.O.o., *Iranian Concrete Code (ABA)*, in *Standard 120*. 2022, Planning and Budget Organization of Iran.

Effect of Pile Geometry on the Interpretation of Pile Integrity Test Results by Numerical Simulation

M Mansoori¹, E Seyedi Hosseininia^{*2}, S Abrishami³

1- Msc, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

2- Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

3- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

Email: eseyedi@um.ac.ir

Abstract

The most important point in performing the Pile Integrity Test (PIT) is the correct interpretation of the results. This insitu tests is very useful in the estimation of the pile length embedded in the soil or the control of the cross section of bored piled where the quality of the pile construction is in doubt. Two common defects of the bored piles are bulging and necking of the pile cross section which correspond to the over-size and narrowing of the pile diameter along the pile length. These two anomalies in the pile geometry influence the pile functionality and an appropriate reaction is required. Correct identifications of the length and depth of an anomaly are among the factors that are influenced by the anomaly location and the interaction of the waves passing through the pile. In this research, an attempt is made to interpret the results of PIT by examining the dimensions and location of anomalies in different parts of the pile as well as the effect of the presence of soil on the obtained results. PIT is simulated by the numerical finite difference method and the results have been investigated. The pile head is loaded by a semi-sinusoidal impact which is defined as a compressive pressure over a circular region at the cross section centroid during a short period of time. The verification of the simulations is established by the comparison of the results with those one-dimensional wave theory which is based on the arrival time of the impact wave to the receiver situated on the pile head. In addition, by changing the position of the wave receiving in the numerical mode, it was shown that the best place to install the accelerometer as the receiver would be at the distance of $0.6R$ from the pile center where R is the pile radius. This finding is consistent with the results of previous studies which confirms the validity of the simulations. According to the results, the existence of the soil around the pile causes to deform the figure of the waves and it required to modify the records before a correct interpretation. The soil around the pile plays a role of damper of the waves passing through the pile and it causes that the magnitude of the peaks observed in the records diminish and the interpretation may not be so easy as that in a free pile. For the pile embedded in the soil, the closer the anomaly location is to the pile head, the less the damping effect of the soil is and thus, the wave forms are more similar to the free pile. Based on the findings of this study, to interpret correctly the PIT results, it is recommended to use the first peak of the recorded velocity if there is a necking defect, while the use of the second peak is recommended for a bulging defect to estimate the anomaly depth based on the free pile diagrams. It is also seen that as the defect length increases to about twice the diameter of the pile, the peak value of the velocity changes (in most cases, it increases) and remains almost constant at larger lengths.

Keywords: Pile integrity test, one-dimensional wave propagation theory, three-dimensional wave propagation effects, anomaly, numerical simulation