



بررسی محدودیت‌های استفاده از روش تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی در آزمایش یکپارچگی شمع (PIT)

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

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد

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

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

ma.mansoori@mail.um.ac.ir

eseyedi@um.ac.ir

s.abrishami@um.ac.ir

خلاصه

از جمله نگرانی‌های اساسی مهندسان عمران یکپارچه بودن شمع‌ها پس از اجرا است. از آنجاکه در شمع‌های درجا ریز احتمال ریزش جداره و یا برآمدگی جداره‌ها و کف وجود دارد، این نگرانی در این شمع‌ها بیشتر است. طی آزمایش یکپارچگی شمع (PIT) یکپارچگی شمع به صورت غیر مخرب بررسی می‌گردد. این آزمایش بدین شکل انجام می‌گردد که یک ضربه توسط چکش به مرکز سر شمع وارد شده و توسط گیرنده در سر شمع دریافت می‌شود. از نمودار سرعت-زمان استخراج شده از این آزمایش می‌توان به محل دقیق نوک شمع و یا احتمال وجود نقص یا عدم یکپارچگی در شمع پی برد. اغلب برای تفسیر نتایج این آزمایش از روش تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی استفاده می‌شود. در حقیقت امواج ایجاد شده تا قبل از رسیدن به جداره‌های شمع به صورت یک نیمکره رفتار می‌کنند و پس از آن به جداره‌ها برخورد کرده و چندین بار منعکس می‌گردند این امواج فقط در محل دور از منبع و تحت شرایط خاصی به صورت یک‌بعدی رفتار می‌کنند و تنها در چنین شرایطی می‌توان از روش تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی استفاده نمود. لذا در این مقاله به بررسی این مسئله که در چه شرایطی می‌توان امواج دور از منبع را با تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی بررسی نمود، پرداخته شده است. در تحقیق انجام شده از شبیه‌سازی عددی به روش اختلاف محدود استفاده شده است و این مطالعات توسط نرم‌افزار FLAC3D انجام شده است. در این مدل‌سازی ضربه به مرکز شمع و با قطر ۰/۸ متر وارد شده و نمودارها در فواصل مختلفی از مرکز استخراج می‌گردد. طی این مطالعات این نتیجه حاصل شده است که در محل 0.6R از مرکز، اثر انعکاسات چندگانه تا حدود زیادی کاهش یافته و در نتیجه امواج تا حدودی به صورت یک‌بعدی رفتار می‌کنند بنابراین می‌توان از روش تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی استفاده نمود.

کلمات کلیدی: آزمایش یکپارچگی شمع، PIT، روش تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی، اثرات سه‌بعدی امواج

۱. مقدمه

برای ارزیابی یکپارچگی شمع روش‌های متنوعی وجود دارد که به دودسته‌ی کلی آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب تقسیم می‌شود. اما از آنجاکه انجام آزمایش‌های مخرب باعث تحمیل هزینه‌های زیادی به پروژه شده و زمان بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد تمایل مهندسان بیشتر به استفاده از آزمایش‌های غیر مخرب است.

می‌توان گفت که روش پالس-اکو در بین روش‌های غیر مخرب پرکاربردترین روش برای شمع‌های بتنی است. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ در اروپا و آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. هرچند تنها زمانی به‌طور گسترده پذیرفته شد که اعمال روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال ممکن شد. از جمله مزایای این روش می‌توان به نیاز به آماده‌سازی کم، امکان پذیر بودن بررسی نقطه‌ای، امکان مشخص شدن شدت و محل قائم نقص و همچنین اطلاعات عمده‌ای که درباره‌ی نقص‌ها می‌دهد اشاره کرد. معایب این روش نیز شامل نیاز به تفسیر آزمایشگاهی روی نتایج، عدم قطعیت نتایج، عدم وجود اطلاعات

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استادیار دانشگاه فردوسی مشهد

از محل افقی نقص، وابستگی نتایج به سرعت فرض شده و همچنین عدم حصول نتایج مناسب در صورت وجود چندین نقص و یا بالاتر بودن طول شمع از محدوده‌ی مورد نظر است.^۱

روش پالس-اکو بدین شکل است که با استفاده از یک چکش دستی کوچک ضربه‌ی آرامی به بالای شمع نواخته می‌شود و حرکات بعدی بالای شمع به وسیله‌ی یک شتاب سنج یا ژئوفون اندازه‌گیری می‌شود. امواج در حرکت به سمت پایین از ناهنجاری‌هایی مانند باریک شدن، برآمدگی و یا آرایش در بتن منعکس می‌شود. ناهنجاری‌ها می‌توانند با شناسایی زمان ورود بازتاب‌ها، اندازه و فاز آن‌ها بر مبنای نظریه‌ی یک بعدی مشخص شوند.

امواج در ناحیه‌ی نزدیک به ضربه به صورت سه بعدی و در ناحیه‌ی دور از ضربه تحت شرایطی به صورت یک بعدی رفتار می‌کند.^۲ در حقیقت رفتار سه بعدی امواج بدین شکل است که امواج در نزدیکی منبع به صورت نیمکره منتشر شده و سپس به جداره‌های شمع برخورد نموده و از جداره‌ها منعکس می‌گردد؛ این انعکاس بارها تکرار شده و باعث نوساناتی به نام نوسانات چندگانه می‌شود. لازم به ذکر است که با کاهش هر چه بیشتر دامنه‌ی نوسانات چندگانه که ناشی از انعکاسات از جداره‌های شمع است نتایج شبیه‌سازی عددی سه بعدی و در نتیجه، نتایج آزمایش یکپارچگی شمع (PIT) به تحلیل یک بعدی امواج تنشی نزدیک تر می‌شود.

از آنجا که در بیشتر مواقع برای تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش یکپارچگی شمع از روش تحلیل امواج تنشی یک بعدی استفاده می‌شود، در این مقاله با استفاده از روش اختلاف محدود توسط نرم‌افزار FLAC3D به بررسی شرایط لازم برای رفتار یک بعدی در ناحیه‌ی دور و در نتیجه استفاده از نظریه یک بعدی امواج پرداخته شده است.

۲. اساس تحلیل امواج تنشی یک بعدی

آزمون یکپارچگی کرنش کوچک یک روش جهانی برای ارزیابی وضعیت شمع است. روش کرنش کوچک بر اساس نظریه انتشار موج یک بعدی است. امواج ایجاد شده در اثر اصابت ضربه چکش به سمت پایین حرکت کرده و با برخورد به نوک شمع منعکس شده و توسط گیرنده در بالای شمع دریافت می‌شود، زمان این رفت و برگشت از فرمول ۱ محاسبه می‌شود:

$$t = \frac{2L}{c} \quad (1)$$

که در آن t زمان یک رفت و برگشت، L طول شمع و c سرعت موج است. برای شمع به طول $L=10$ متر و سرعت $c=4000$ متر بر ثانیه مقدار $t=0.005$ ثانیه است.

در روش انتشار یک بعدی امواج تنشی، سرعت موج c ، صرف نظر از نسبت پواسون، می‌تواند با استفاده از معادله زیر محاسبه شود:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

که در آن E مدول الاستیک دینامیکی و ρ چگالی شمع است. در این مقاله مدول الاستیک دینامیکی شمع $E=40$ گیگا پاسکال و چگالی شمع $\rho=2500$ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. در نتیجه مقدار سرعت موج در شمع $c=4000$ متر بر ثانیه محاسبه می‌گردد.

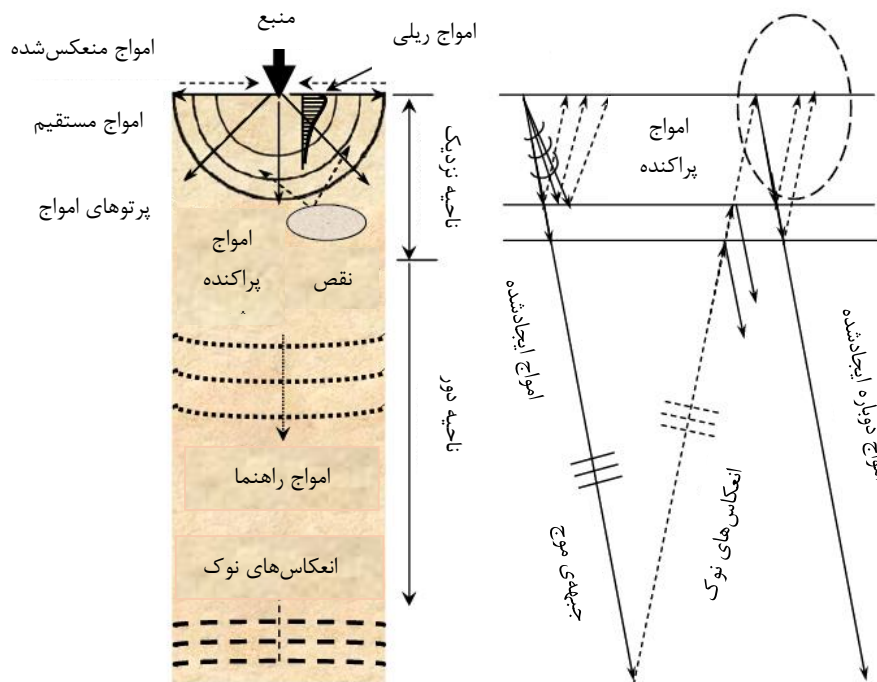
۳. خصوصیات امواج

الف) امواج در ناحیه‌ی نزدیک به منبع

امواج در نزدیکی منبع کاملاً به صورت سه بعدی رفتار می‌کنند؛ رفتار امواج در این ناحیه بدین شکل که امواج به صورت یک نیمکره داخل شمع منتشر شده و بخشی از امواج در سطح شمع و به صورت شعاعی پخش می‌شوند. به این امواج که در سطح شمع پخش می‌شوند امواج مستقیم می‌گویند.

ب) امواج دور از منبع:

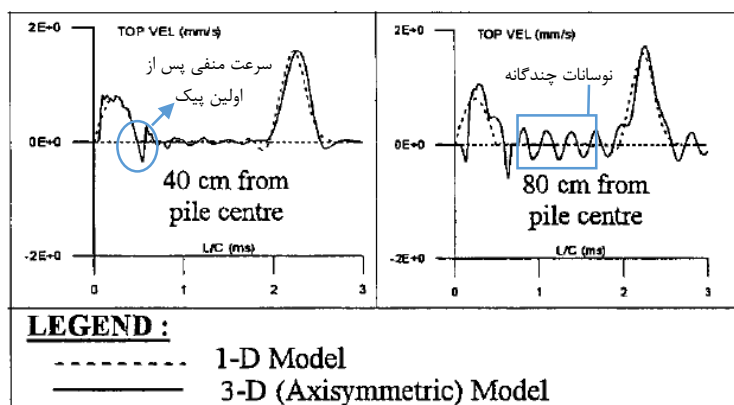
در ناحیه‌ی دور از منبع امواجی به نام امواج راهنما موجود هستند. امواج P و S تولید شده از منبع در مرزها تولید امواج جدیدی به نام امواج راهنما می‌کنند. نحوه‌ی شکل‌گیری این امواج بدین شکل است که با انعکاس امواج P و S از جداره‌ها و تداخل این انعکاس‌ها باهم امواج راهنما در ناحیه‌ی دور از منبع شکل می‌گیرد. این امواج تحت شرایطی که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود می‌توانند توسط نظریه امواج تنشی یک بعدی تفسیر گردد. در شکل ۱ نحوه‌ی انتشار امواج در شمع و شکل‌گیری امواج راهنما ملاحظه می‌گردد.



شکل ۱ - نحوه شکل گیری امواج راهنما^۲

۴. اثر سه بعدی بودن امواج بر نمودار سرعت-زمان:

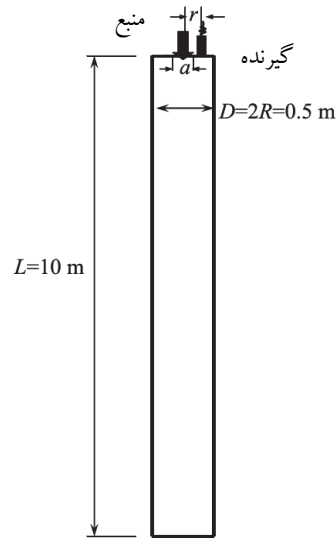
انتشار سه بعدی امواج در واقعیت روی نمودار سرعت-زمان تأثیر می گذارد. همان طور که در شکل ۲ ملاحظه می شود این انتشار سه بعدی باعث ایجاد نوسانات چندگانه بین دو پیک و ورودی و پیک انعکاس از نوک شمع می شود. همچنین باعث ایجاد یک سرعت منفی پس از اولین پیک می گردد. به منظور استفاده از تحلیل امواج تنشی یک بعدی باید این اثرات را تا جای ممکن کاهش داد.



شکل ۲ - مقایسه نمودار سرعت زمان یک بعدی و سه بعدی^۴

۵. هندسه و ویژگی های شمع مدل شده در نرم افزار FLAC3D

در این مقاله مطالعات مربوط به یک شمع سالم مدل شده در نرم افزار FLAC3D به روش اختلاف محدود، ارائه شده است. این شمع به طول ۱۰ متر، شعاع ۰/۲۵ متر، مدول الاستیسیته ۴۰ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ است. هندسه شمع در شکل ۳ ارائه شده است و پس از اعمال بار دینامیکی ضربه ای آن بررسی شده است. از آنجا که کرنش ایجاد شده در این آزمایش بسیار کوچک است لذا می توان گفت رفتار مصالح شمع در محدوده الاستیک است بنابراین برای مصالح شمع از مدل الاستیک استفاده شده است.



شکل ۳ - هندسه‌ی شمع مورد مطالعه

۶. مش بندی مدل

برای انتقال صحیح موج، طول المان پارامتر مهمی است؛ بنابراین انتخاب طول المان مناسب ضروری است. کیولمیر و لیسمر^۵ نشان می‌دهند که برای نمایش دقیق انتقال موج از طریق یک مدل، اندازه عنصر فضایی، باید کمتر از یک‌دهم تا یک‌هشتم طول موج بالاترین مؤلفه فرکانس ورودی باشد.

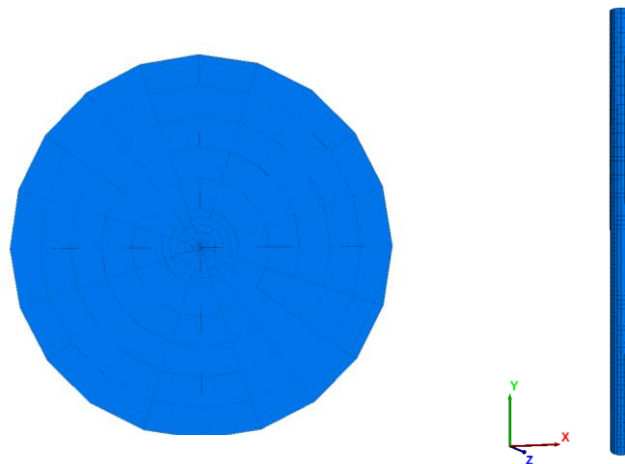
$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{10} \quad (۳)$$

λ طول موج بالاترین مؤلفه فرکانس ورودی بوده و ΔL طول المان در جهت انتشار موج است. برای طول موج $\lambda = 4$ و 2 متر، مقدار طول المان ΔL باید به ترتیب از مقادیر 0.4 و 0.2 کمتر باشد.

$$\lambda = T \times c \quad (۴)$$

T مدت زمان پالس ورودی و c سرعت موج است. برای مدت زمان پالس ورودی $T = 1$ میلی‌ثانیه و 0.5 میلی‌ثانیه و سرعت موج $c = 4000$ متر بر ثانیه مقدار λ به ترتیب 4 و 2 متر محاسبه می‌شود.

مطابق شکل ۴ (ب) طول المان در جهت انتشار موج 0.1 متر در نظر گرفته شده است بنابراین طول المان انتخاب شده در محدوده‌ی مناسب است. همان‌طور که در شکل ۴ (ب) ملاحظه می‌شود، مقطع شمع به 20 قطاع تقسیم شده است. بخش داخلی آن، که ضربه چکش در آن محدوده نواخته می‌شود و به قطر 0.1 متر است، جهت دقت بیشتر در محاسبات به 5 قسمت و قسمت خارجی نیز به 5 قسمت تقسیم شده است.



(الف) (ب)

شکل ۴ - مش بندی شمع مدل شده

۷. بار ورودی در مرکز سر شمع

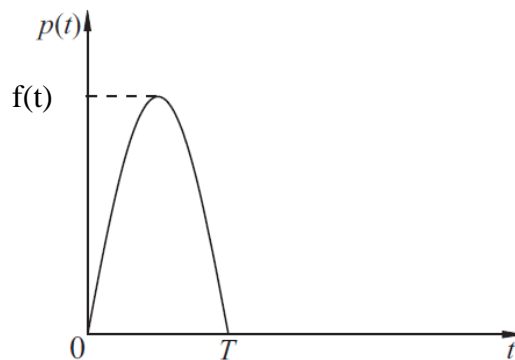
بار ضربه‌ای به صورت یک موج نیمه سینوسی در مرکز شمع اعمال می‌شود و رابطه‌ی آن به صورت زیر است:

$$f(t) = Q \sin \left[\left(\frac{\pi}{T} \right) t \right] \quad (t \leq T) \quad (۴)$$

$$f(t) = 0 \quad (t > T)$$

که در آن Q مقدار بیشینه‌ی ضربه‌ی ورودی، T مدت‌زمان پالس ورودی است. در این مقاله $Q = ۶$ کیلو نیوتن و $T = ۰/۵$ میلی ثانیه و ۱ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است.

شکل ۵ پالس ورودی به سر شمع را نمایش می‌دهد. همان‌طور که گفته شد مقدار Q ، ۶ کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است. مدت‌زمان پالس ورودی (T) نیز جهت بررسی تأثیر فرکانس پالس ورودی بر کاهش نوسانات، ۱ میلی ثانیه و ۰/۵ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است.



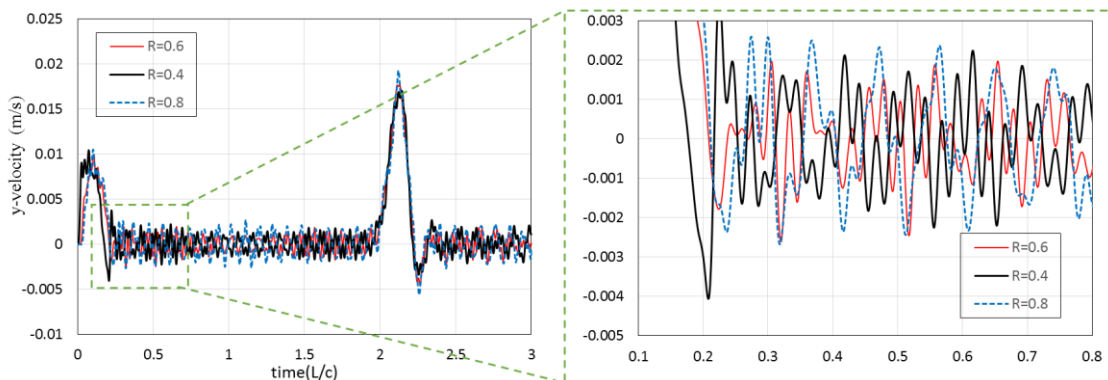
شکل ۵ - پالس ورودی به مرکز سر شمع

از آنجا که کاهش نوسانات چندگانه باعث نزدیک شدن نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی به نتایج تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی می‌شود، در ادامه سعی بر آن است تا دامنه‌ی این نوسانات چندگانه، تا جای ممکن کاهش یابد. برای این منظور سه پارامتر محل قرارگیری گیرنده که محل استخراج نمودار سرعت-زمان است، تأثیر اعمال میرایی ریلی و مقدار فرکانس پالس ورودی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۸. تأثیر محل قرارگیری گیرنده

در این مقاله برای بررسی تأثیر محل قرارگیری گیرنده، نمودار سرعت-زمان در سه محل با فواصل افقی $0.4R$ ، $0.6R$ و $0.8R$ از مرکز شمع در تراز فوقانی آن استخراج شده است. همان‌طور که ذکر شد، هرچه میزان دامنه‌ی نوسانات کمتر باشد و سرعت منفی ایجاد شده پس از پیک اول کمتر باشد اثرات سه‌بعدی کمتر بوده و در نتیجه می‌توان از روش تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی برای تفسیر نتایج استفاده نمود.

در شکل ۶ مقایسه‌ی بین نمودار سرعت-زمان استخراج شده در سه محل به فواصل $0.4R$ ، $0.6R$ و $0.8R$ از مرکز شمع، جهت مقایسه‌ی اثرات سه‌بعدی بودن امواج در این سه محل انجام شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد میزان دامنه‌ی نوسانات در فاصله‌ی $0.4R$ و $0.6R$ از مرکز به علت نویزهای زیاد قابل مقایسه نیستند اما تقریباً می‌توان دید که دامنه‌ی نوسانات در $0.8R$ از هر دو مکان $0.6R$ و $0.4R$ بیشتر است. تأثیر اصلی سه‌بعدی بودن امواج در شمع‌های سالم در پاسخ سرعت اولیه منفی که پس از اولین پیک مثبت قرار می‌گیرد، نمایان است. این پاسخ شبیه به حالتی است که در شمع یک خرابی سطحی موجود باشد، بنابراین اگر این مسئله تشخیص داده نشود یک تفسیر اشتباه از شرایط شمع می‌شود^۴. مطابق شکل ۶ در فاصله افقی $0.4R$ از مرکز شمع این مقدار سرعت منفی ذکر شده از دو گیرنده دیگر بیشتر است. بنابراین می‌توان به صورت تقریبی بیان کرد که قرارگیری گیرنده در فاصله‌ی $0.6R$ بهینه بوده و برای تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی مناسب‌تر است. از آنجا که نویزهای ایجاد شده در این نمودار تفسیر درست نتایج را مختل می‌کند برای اطمینان از نتایج این بخش از میرایی ریلی برای کاهش نویزها استفاده شده و در بخش بعدی بررسی شده است.



شکل ۶- مقایسه‌ی نمودار سرعت-زمان برای سه حالت قرارگیری گیرنده در فواصل 0.4R، 0.6R و 0.8R از مرکز شمع

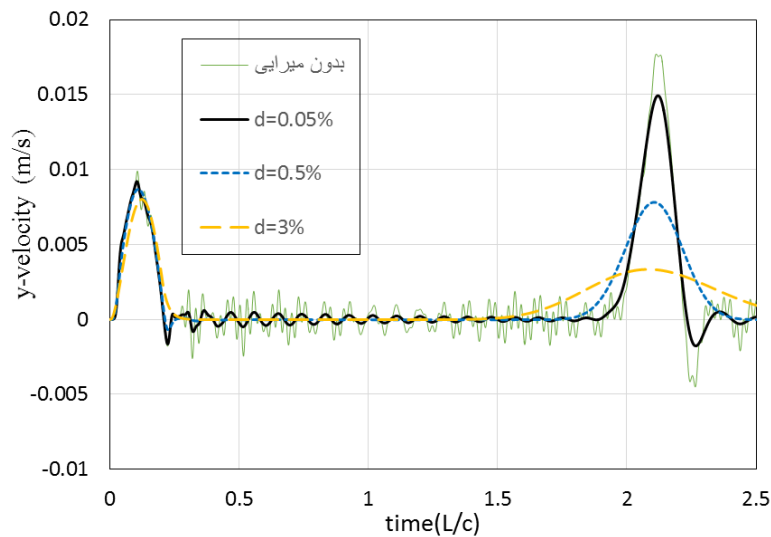
۹. تأثیر اعمال میرایی ریلی

برای از بین بردن نویزهای اضافه میرایی ریلی به مدل اعمال شده است. این تحلیل با کامپوتری به مشخصات پردازشگر intel(R) core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70 GHz و حافظه رم آن ۱۲ گیگابایت انجام شده است. با اعمال میرایی‌های ۰/۳٪، ۰/۵٪، ۰/۰۵٪ و عدم اعمال میرایی، زمان تحلیل‌های متفاوتی رخ می‌دهد که در جدول ۱ بیان شده است. طبق جدول ۱ اعمال میرایی ۰/۳٪ به شمع بالاترین زمان تحلیل دینامیکی، ۲۶ ساعت، را به خود اختصاص داده است و تحلیل دینامیکی شمع بدون اعمال میرایی کمترین زمان یعنی ۵ دقیقه را به خود اختصاص داده است.

جدول ۱- بررسی مقدار میرایی ریلی در زمان تحلیل دینامیکی

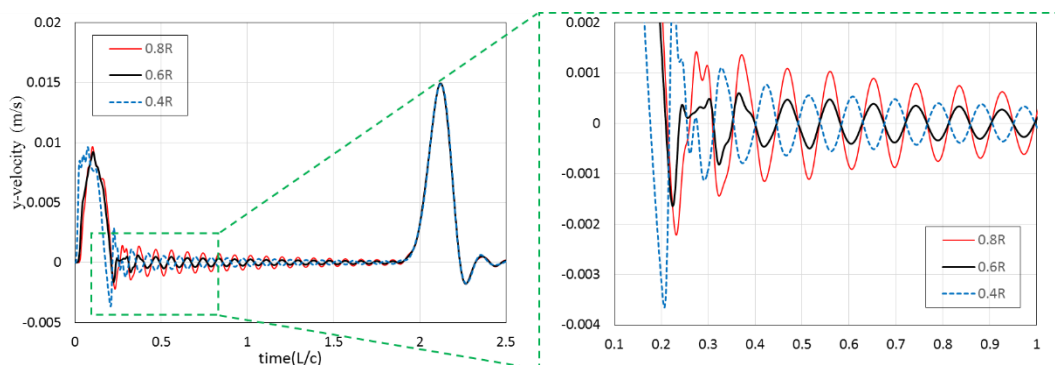
میرایی	زمان تحلیل دینامیکی
بدون میرایی	۵ دقیقه
با میرایی ۰/۰۵ درصد	۳۰ دقیقه
با میرایی ۰/۵ درصد	۵ ساعت
با میرایی ۰/۳ درصد	۲۶ ساعت

شکل ۷ مقایسه‌ای بین نمودار سرعت-زمان با میرایی‌های ریلی ۰/۳٪، ۰/۵٪، ۰/۰۵٪ و عدم حضور میرایی ریلی است. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود نوسانات و نویزها در صورت عدم اعمال میرایی بسیار زیاد بوده و مقایسه‌ی صحیح بین اثر محل قرارگیری گیرنده در محل‌های مختلف را مختل می‌کند. بنابراین میرایی ریلی به کار بسته شد، با اعمال میرایی ریلی ۰/۳٪، تمام نوسانات و سرعت منفی پس از پیک اول از بین رفته و جایی برای مقایسه‌ی بین نوسانات باقی نمی‌ماند همچنین پیک دوم آن‌چنان کاهش ارتفاع و افزایش عرض میابد که تعیین دقیق محل نوک شمع که باید به مقدار یک رفت و برگشت در طول شمع یعنی $2L/c$ باشد را دچار مشکل می‌نماید. با توجه به نکات ذکر شده و زمان بسیار بالای تحلیل دینامیکی در این حالت می‌توان نتیجه گرفت که اعمال میرایی ۰/۳٪ برای این منظور مناسب نیست. با اعمال میرایی ۰/۵٪ زمان تحلیل دینامیکی کاهش چشمگیری دارد نوسانات کاملاً از بین می‌رود اما سرعت منفی پس از پیک اول همچنان وجود دارد و قابل مقایسه است و همچنین مقدار کاهش طول و افزایش عرض آن نسبت به میرایی ۰/۳٪ کمتر است اما هنوز هم زمان تحلیل دینامیکی ۵ ساعت زیادی است و دامنه نوسانات قابل مقایسه نیست همچنین باز هم محل نوک شمع کمتر از مقدار واقعی شناسایی می‌شود. از این رو میرایی ۰/۰۵٪ اعمال شد، با اعمال این میرایی علاوه بر کاهش قابل توجه زمان تحلیل دینامیکی به مقدار منطقی ۳۰ دقیقه، دامنه نوسانات قابل ملاحظه و مقایسه هستند. نویزهای آن گرفته شده و شکل درست و قابل مقایسه‌ای از امواج ارائه می‌دهد از طرفی سرعت منفی پس از اولین پیک هم در این حالت کاملاً مشاهده شده و قابل مقایسه است. به علاوه با اعمال این مقدار میرایی محل تقریبی نوک شمع نیز به درستی مشخص می‌شود. از این جهت در شکل ۸ مقدار نوسانات و سرعت منفی در میرایی ۰/۰۵٪ در فواصل مختلف گیرنده‌ها مقایسه شده است.



شکل ۷- مقایسه نمودار سرعت-زمان با اعمال میرایی‌های مختلف در فاصله $0.6R$ از مرکز سر شمع

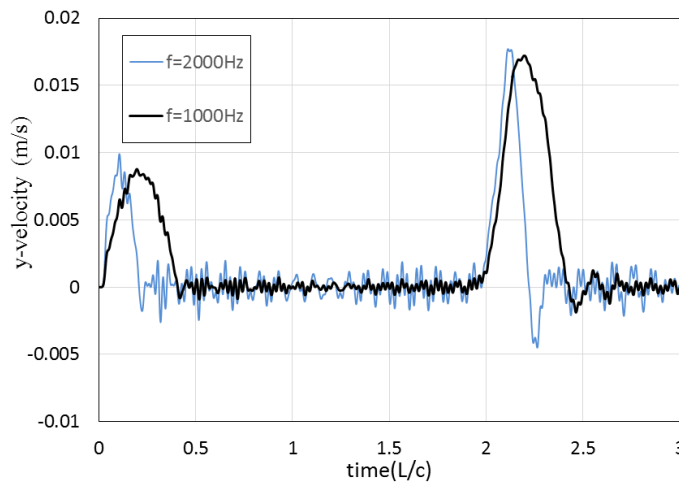
با توجه به نتایج شکل ۷، در شکل ۸ به بررسی اثر محل قرارگیری گیرنده، در صورت اعمال میرایی 0.5% پرداخته شده است. طبق شکل ۸ سرعت منفی پس از اولین پیک که نشانه‌ی رفتار سه‌بعدی امواج است و برای استفاده از تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی مناسب نیست در فاصله‌ی $0.6R$ از مرکز کاهش یافته و بهینه می‌گردد. این نتیجه با نتایج چو و همکاران^۴ تطابق دارد. از طرفی طبق این شکل دامنه‌ی نوسانات در $0.6R$ کمینه شده و از این رو بهترین محل برای قرارگیری گیرنده جهت استفاده از تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی است. این نتیجه با نتایج چای و فون^۲ یکسان است.



شکل ۸- مقایسه‌ی نمودار سرعت-زمان برای سه حالت قرارگیری گیرنده در فواصل $0.8R$ و $0.6R$ ، $0.4R$ از مرکز شمع با اعمال میرایی ویلی 0.5%

۱۰. تأثیر فرکانس موج ورودی

طی مطالعات انجام شده مقدار فرکانس پالس ورودی بر روی دامنه‌ی نوسانات اثرگذار است. از این رو در این بخش با اعمال دو فرکانس 1000 هرتز و 2000 هرتز به بررسی تأثیر این پارامتر روی دامنه‌ی نوسانات و سرعت منفی پس از اولین پیک پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد با افزایش فرکانس، دامنه‌ی نوسانات چندگانه افزایش یافته و سرعت منفی پس از اولین پیک نیز افزایش می‌یابد، از این رو می‌توان گفت هر چه فرکانس موج ورودی کمتر باشد رفتار امواج به حالت یک‌بعدی نزدیک‌تر بوده و می‌توان آن را توسط تحلیل امواج تنشی یک‌بعدی اندازه‌گیری کرد.



شکل ۹- مقایسه‌ی نمودار سرعت زمان برای دو فرکانس ۱۰۰۰ و ۵۰۰ هرتز

۱۱. نتیجه‌گیری

همان‌طور که ذکر شد جهت استفاده از تحلیل امواج تنش‌ی یک‌بعدی برای تفسیر نتایج آزمایش یکپارچگی شمع باید شرایطی برقرار باشد. طبق مطالعات انجام‌شده در این مقاله در صورت عدم استفاده از میرایی ریلی نویزهای ایجادشده مانع از نتیجه‌گیری دقیق برای محل قرارگیری گیرنده شده است. از این رو اعمال میرایی ریلی مورد بررسی قرار گرفت و میرایی ریلی ۰/۰۵٪ از نظر زمان تحلیل دینامیکی، درستی تشخیص محل نوک شمع، وضوح نوسانات و سرعت منفی پس از اولین پیک بهینه شناخته شد. با اعمال میرایی ریلی ۰/۰۵٪، در صورت قرار گرفتن گیرنده در فاصله‌ی افقی 0.6R از مرکز شمع دامنه‌ی نوسانات و سرعت منفی پس از اولین پیک کاهش یافته و در نتیجه رفتار امواج به رفتار یک‌بعدی نزدیک‌تر است. همچنین هر چه فرکانس موج ورودی کمتر باشد این امواج به امواج یک‌بعدی نزدیک‌تر می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت در محل 0.6R و فرکانس کمتر رفتار امواج بهینه بوده و می‌توان از تحلیل امواج تنش‌ی یک‌بعدی برای تفسیر نتایج استفاده نمود.

۱۲. مراجع

1. Rausche, F., "Nondestructive evaluation of deep foundation," In *fifth international conference on case histories in geotechnical engineering*, GRL Engineers: new York, 2004.
2. Chai, H.-Y.; Phoon, K.-K., "Detection of Shallow Anomalies in Pile Integrity Testing," *International Journal of Geomechanics* 2013, 13 (5), pp 672-677.
3. Chai, H.-Y.; Wei, C.-F.; Phoon, K.-K.; Yang, Y.-M., "Some observations on the performance of the signal matching technique in assessment of pile integrity," *Journal of nondestructive evaluation* 2011, 30 (4), pp 246-258.
4. chow, Y. K.; ASCE, m.; Phoon, k. k.; asce, m.; chow, w. f.; wong, k. y., "Low strain integrity testing of piles: three-dimensional effects," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 2003, 129 (11), pp 1057-1062.
5. Kuhlemeyer, R. L.; J., L., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 1973, 99 (5), pp 421-427.