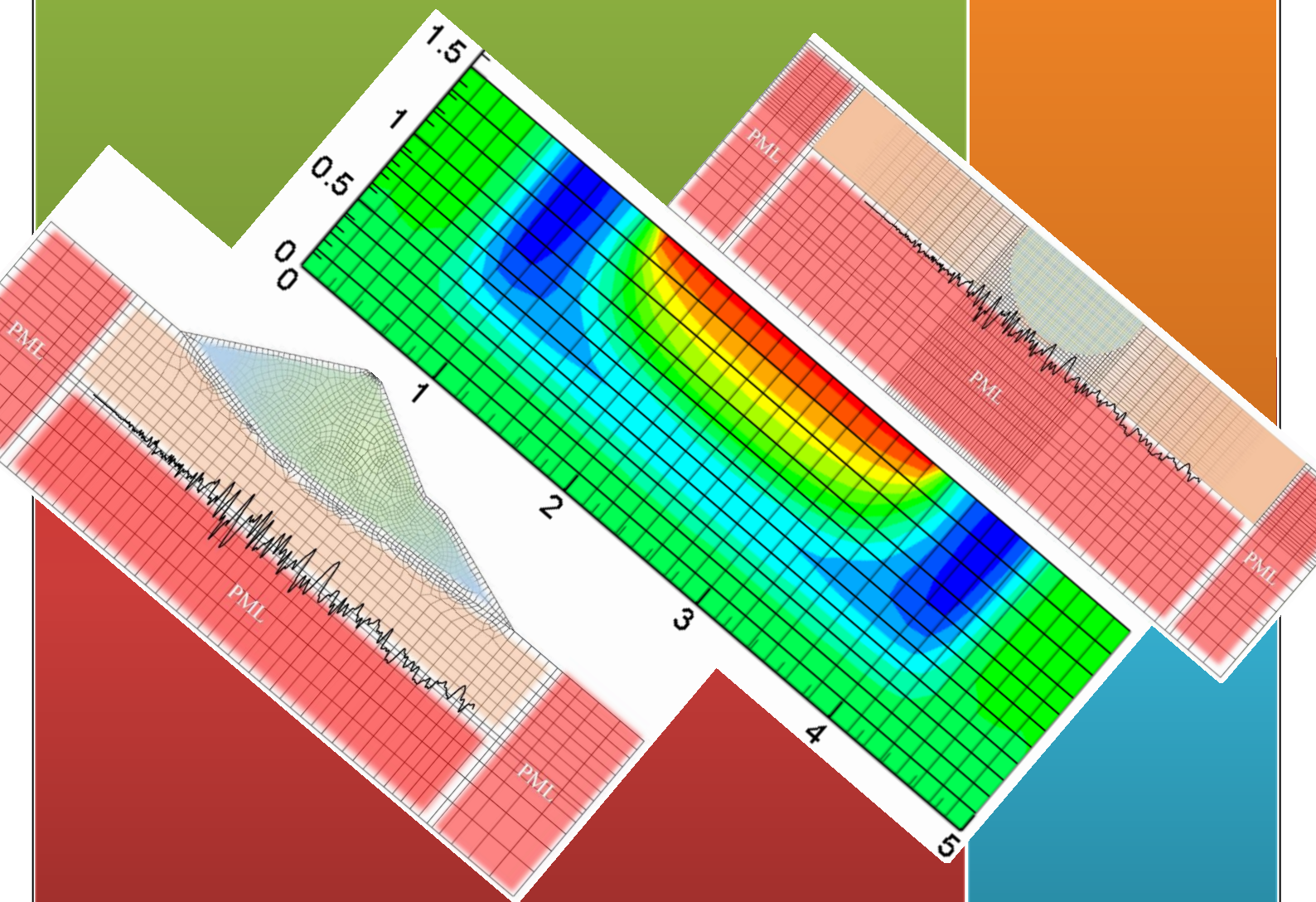


راهنمای علمی و آموزشی نسخه آنلاین

نرم افزار IDAMP

(تحلیل دینامیکی اندرکنش خاک - سازه با استفاده از PML)



پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

وابسته به وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

مؤلفان:

محمد داودی، دانشیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

عباس پوردیلمی، استادیار دانشگاه دامغان، سمنان

رضا افضل سلطانی، دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

* مسئولیت صحت دیدگاه‌های علمی بر عهده مؤلفین بوده و کلیه حقوق اثر حاضر متعلق به پژوهشگاه بین المللی

زلزله شناسی و مهندسی زلزله می‌باشد.

** ذکر مطالب با اشاره به مرجع بلامانع می‌باشد.

پیشگفتار:

نرم افزار حاضر بر پایه مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل دینامیکی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه و خاک با استفاده از لایه های کاملاً تطبیق یافته (PML) به روش اجزاء محدود، در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله تهیه گردیده است. در نسخه حاضر (نسخه ۲۰۰۰) قابلیت تحلیل مدل دوبعدی با بارگذاری معین در گره های مشخص مدل (همچون بارگذاری ناشی از ارتعاش پی ماشین آلات صنعتی و ...) و نیز مدل سازی و تحلیل تحریک از مرزها (همچون تحریک زمین لرزه و ...) در محیط الاستیک خطی تک فاز، فراهم گردیده است. همچنین نسخه های آتی این نرم افزار توانایی مدل سازی و تحلیل محیط سه بعدی و نیز محیط های الاستوپلاستیک چند فازه را نیز خواهند داشت که امید است این مهم نیز در سال های آینده اجرایی گردد.

شایان ذکر است که صحت سنجی نرم افزار حاضر با مثال های متعدد در قالب پروژه های پژوهشی در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله صورت گرفته است، با این وجود تیم پژوهشی پدیدآورنده نرم افزار عملکرد عاری از خطای آن را تضمین نمی کند. لذا کاربران پذیرفته اند که این نرم افزار به منظور تامین اهداف تحقیقاتی تهیه گردیده است؛ مسئولیت استفاده از داده های خروجی و همچنین اطمینان از صحت نتایج بر عهده کاربران بوده و پدیدآورندگان هیچگونه تعهدی در این خصوص نمی پذیرند. پیشنهاد می شود خروجی های این نرم افزار به منظور استفاده در پروژه های صنعتی با نتایج سایر نرم افزارها نیز کنترل گردد.

همچنین بدینوسیله از تمامی زحمات سرکار خانم عسکری از بخش پردازش و خدمات رایانه ای پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله بابت همکاری و فراهم کردن بستر لازم جهت ارائه آنلاین نرم افزار IDAMP تقدیر و تشکر می گردد.

فهرست

پیشگفتار	أ
فهرست	ب
۱- بخش اول: راهنمای علمی	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- پیشینه شرایط مرزی	۱
۳-۱- لایه‌های کاملاً تطبیق یافته	۶
۴-۱- فرمولاسیون لایه‌های PML در حوزه زمان	۶
۵-۱- معرفی نرم افزار	۸
۱-۵-۱- ورودی‌های برنامه	۸
۲-۵-۱- الگوریتم حل برنامه	۸
۳-۵-۱- صحت‌سنجی	۱۰
۱-۳-۵-۱- مساله اول: محاسبه سرعت موج انتشار یافته در محیط	۱۰
۲-۳-۵-۱- مساله دوم: بزرگنمایی امواج در بدنه سد	۱۴
۳-۳-۵-۱- مساله سوم: کارایی PML در مدل‌سازی انتشار امواج سطحی	۱۷
۴-۳-۵-۱- صحت‌سنجی نتایج نرم افزار حاضر با سایر نرم افزارها	۱۹
۲- بخش دوم: راهنمای کاربردی	۲۴
۱-۲- ورود به برنامه	۲۴
۲-۲- نمایش کانتور	۳۲
۳-۲- نمایش نمودار	۳۵
۴-۲- نمایش تغییر شکل	۳۸
مراجع	۴۱

۱- بخش اول: راهنمای علمی

۱-۱- مقدمه

حل معادله موج در محیط نامحدود در مسائلی همچون شبیه سازی زلزله [۱]، اندرکنش خاک و سازه [۲، ۳]، اندرکنش سد و مخزن [۴]، انتشار امواج الکترومغناطیس [۵]، مکانیک کوانتوم [۶] و ... مورد توجه محققین بسیاری بوده است که مستلزم اعمال شرط تشعشع در راستاهای نامحدود می‌باشد. این شرط ایجاب می‌کند که در یک راستای نامحدود امواج بدون هیچگونه انعکاس غیرواقعی در محیط منتشر گردند.

در روش‌های عددی بخش محدودی از محیط مسئله مدلسازی می‌شود و اعمال شرط تشعشع در آن مستلزم این می‌باشد که شرایط مرزی مناسبی اختیار گردد تا عبور امواج از مرزهای اقطاع مدل، با کمترین هزینه‌های محاسباتی امکانپذیر گردد. در شرایط ایده‌آل، این کوتاه‌سازی بایستی حداقل سه مشخصه کارآیی، سهولت حل و پشتوانه تئوریک داشتن را تأمین نماید. در حقیقت، از گام‌های اولیه برای حل عددی مساله از طریق روش اجزاء محدود، انتخاب شرایط مرزی مناسب برای جایگزینی شرایط انتشار هندسی در بی‌نهایت یا همان مفهوم میرایی تشعشعی می‌باشد. از طرف دیگر، در شبیه‌سازی مسائل انتشار موج در محدوده‌های غیرمحصور باید به نحوی انرژی در مرزهای مدل جذب شده و از انعکاس غیر فیزیکی هر موج خروجی ممانعت گردد.

شرایط مرزی عموماً بر اساس حل‌های نیمه تحلیلی در حوزه فرکانس ارائه شده است و به سیستم‌های خطی با مصالح هموزن و ایزوتروپیک و با هندسی ساده محدود می‌شوند و فرمولاسیون آن‌ها در حوزه زمان بسیار پیچیده می‌باشد.

۱-۲- پیشینه شرایط مرزی

نگاشت‌های دیریکله-نیومن گروهی از شرایط مرزی دقیق هستند که در روش اجزای محدود مورد استفاده قرار می‌گیرند و شرط مرزی در آن به صورت رابطه‌ای بین تابع و مشتقات آن نسبت به مکان بیان می‌گردد. در سال ۱۹۷۸ فیکس و مارین از روش DtN در حل مسائل مربوط به محیط‌های نامحدود سیال بهره بردند [۷]. در سال ۱۹۸۲ گلدستین از نگاشت‌های DtN در حل مسئله Helmholtz

محیط‌های نیمه بینهایت با روش اجزاء محدود کمک گرفتند [۸]. در سال ۱۹۸۵ کانوتو و هاریهاران با کمک گرفتن از روش‌های طیفی، چگونگی حل معادلات دیفرانسیل بیضوی در محیط‌های نامحدود با استفاده از شرایط مرزی DtN را مورد بررسی قرار دادند [۹]. مشابه آن در سال ۱۹۸۹ گیولی و کلر با ترکیب نگاشت‌های DtN و اجزاء محدود، یک روش کلی و عملی برای حل مسائل در محیط‌های نامحدود ارائه دادند [۱۰، ۱۱]. در سال ۱۹۹۸ گیولی و پاتلاشکو روشی کلی برای گسسته سازی روابط DtN پیشنهاد کردند [۱۲]. در سال ۲۰۰۴ گروت و کیرسچ از نگاشت‌های DtN برای حل معادله موج اسکالر در محیط‌های نامحدود و با در نظر گرفتن چندین منبع پخش کننده امواج استفاده کردند [۱۳].

روش اجزاء محدود با مرز مقیاس شده یکی دیگر از روش‌های دقیق پیشنهاد شده می‌باشد که روشی نیمه تحلیلی است. در این روش مرز محیط گسسته سازی شده و در راستای بعد دیگر مسئله به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. متغیرهای مربوط به نقاط مرزی از درونبایی بین داده‌های مربوط به گره‌المان‌های تشکیل دهنده مرز به دست می‌آیند و متغیرهای مربوط به سایر نقاط محیط با مقیاس کردن داده‌های نقاط متناظر آن‌ها روز مرز محاسبه می‌گردند. این روش حاصل تکامل روش‌های مبتنی بر تشابه می‌باشد. در سال ۱۹۸۲ داسگوپتا در روشی به نام Cloning یک مرز مجازی مشابه مرز محیط محدود در نظر گرفته و با استفاده از فرض تشابه و ماتریس جرم و سختی استاتیکی بخش محدود بین دو مرز، ماتریس سختی دینامیکی محیط نامحدود را استخراج کرده است [۱۴]. در سال ۱۹۹۶ ولف و سانگ نیز با استفاده از تشابه روش Forcasting را ارائه کردند که در آن تاثیر محیط نامحدود بر پاسخ سازه با لحاظ کردن تاخیر رسیدن موج از مرز داخلی به مرز خارجی ارزیابی کردند که برای برطرف کردن نواقص روش مذکور، فرض کرده‌اند که فاصله بین مرز داخلی و مرز خارجی بینهایت کوچک می‌باشد و بدین ترتیب به روش اجزا محدود با مرز مقیاس شده دست یافتند [۱۵-۱۹].

المان نیمه بینهایت (هایپر المان) یکی دیگر از روش‌های دقیق در حل مسئله اندرکنش سد-سنگ پی می‌باشد. در این روش سنگ پی محیطی لایه‌ای بر روی بستر صلب فرض می‌شود و با توجه به اینکه ارتفاع لایه‌های سنگ پی محدود می‌باشند، در راستای عمود بر لایه‌ها از روش گسسته سازی اجزاء مرزی و در طول لایه‌ها مسئله انتشار امواج به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با حل معادله درجه حاصل از ترکیب معادلات انتشار امواج در لایه‌های مختلف و ترکیب مودهای مختلف به همراه پاسخ خصوصی مسئله، ماتریس سختی دینامیکی سنگ پی در حوزه فرکانس حاصل می‌گردد. در سال

۱۹۷۲ واس با استفاده از هایپر المان به بررسی مسئله انتشار امواج در محیط دو بعدی پرداخته است [۲۰]. در سال ۱۹۷۵ کاوسل و روست از هایپر المان در مسائل دارای تقارن محوری برای محاسبه سختی دینامیکی شالوده‌های دایره‌ای شکل استفاده کردند [۲۱]. در سال ۱۹۸۷ لطفی و همکارانشان با ترکیب هایپر المان جامد و سیال، اندرکنش سد-مخزن-سنگ پی را در تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی در حوزه فرکانس مورد مطالعه قرار دادند [۲۲]. در سال ۲۰۰۰ کیم و همکارانشان در حل مسائل سه بعدی در مختصات کارتیزین از هایپر المان استفاده کردند [۲۳]. در سال ۲۰۰۶ بوگاچا و تاسولاس با استفاده از هایپر المان تاثیر مصالح ته نشین شده در کف مخزن را بر آنالیز دینامیکی سدهای بتنی وزنی مورد بررسی قرار دادند [۲۴]. در سال ۲۰۰۸ ملکی جوان و نورزاد با تعمیم روش کیم، رفتار شمع‌ها در محیط‌های منخلخل اشباع را مورد مطالعه قرار دادند [۲۵، ۲۶].

شرایط مرزی تقریبی کلاسیک، نسبت به روش‌های دقیق دارای هزینه محاسباتی کمتری (به دلیل سادگی روابط) می‌باشند اما برای حصول اطمینان از دقت مناسب، بخش بزرگتری از محیط نامحدود مورد مطالعه بایستی مدلسازی شود؛ زیرا در این روش‌ها تنها امواج با زوایای برخورد مشخصی به طور کامل جذب می‌شوند و امواج دیگر پس از برخورد به مرزها منعکس می‌گردند. شرایط مرزی معرفی شده در سال ۱۹۶۹ توسط لایزمر و کوهلمیر از این دست شرایط مرزی می‌باشد که به شرایط مرزی ویسکوز می‌باشد و امواج مسطح عمود بر مرز را به طور کامل از خود عبور می‌دهند. شرایط مرزی ویسکوز به لحاظ فیزیکی، معادل یک میراگر ساده بوده و به جهت سادگی، استفاده از آن در روش‌های عددی کاربرد فراوانی دارد [۲۷]. در سال‌های ۱۹۷۷ و ۱۹۷۹ انگکوئیست و ماجدا با تخمین گویای معادله Dispersion، شرایط مرزی مجانب را ارائه کردند [۲۸، ۲۹]. در همین سال‌ها بایلیس و تورکل شرایط مرزی مجانب برای امواج الاستیک در مختصات کروی را پیشنهاد کرده‌اند [۳۰، ۳۱]. در سال‌های ۱۹۸۶ و ۱۹۸۷ هیگدان شرایط مرزی چند جهتی را ارائه و از آن در روش تفاضل محدود استفاده کرد. این شرایط مرزی امواجی را که با زاویه α (زاویه نسبت به محور افقی) به مرزها برخورد می‌کنند را به صورت دقیق و بودن هیچ انعکاسی از خود عبور می‌دهند و دقت آن با بیستر شدن زاویه افزایش می‌یابد اما با توجه به وجود مشتقات جزئی مرتبه بالا، استفاده از آن در روش‌های عددی مشکل می‌باشد [۳۲، ۳۳].

از دیگر روش‌های تقریبی اعمال شرط تشعشع، شرایط مرزی مرتبه بالا می‌باشد که به یک سری شرایط مرزی غیرانعکاسی گفته می‌شود که هر که یک از شرایط سری مورد نظر نسبت به شرط مرزی قبلی دارای مرتبه بالاتر و دقت بیشتری می‌باشد. این دسته از شرایط مرزی اگرچه با انتخاب مرتبه مناسب به دقت قابل قبولی منجر می‌شود، اما مستلزم به کارگیری روش‌های خاص و بعضاً پیچیده جهت استفاده از آن در روش اجزاء محدود می‌باشد. در دهه ۱۹۸۰ سری با شرایط مرزی با مرتبه دلخواه ارائه گردید اما به دلیل وجود مشتقات مرتبه بالا، کاربرد آن‌ها در روش‌های عددی محدود بوده است [۳۴]. در سال ۱۹۹۳ کولینو شرایط مرزی انگکوئیزیت و ماجدا را که با تخمین گویای معادله Dispersion به دست آمده بود را با تعریف توابع کمکی به گونه‌ای بیان کرد که بتوان آن را با مرتبه دلخواه در روش‌های عددی به کاربرد [۳۵]. در سال ۱۹۹۸ هاگستروم و هاریهاران با معرفی توابع کمکی بر اساس فرمولاسیون بایلیس و تورکل شرایط مرزی مرتبه بالایی ارائه کردند که فاقد مشتقات درجه بالا بود و با مرتبه دلخواه در روش‌های عددی قابل استفاده می‌باشد [۳۶]. در سال ۲۰۰۰ گوداتی و تاسولاس بر مبنای Continued fraction شرایط مرزی مرتبه بالایی ارائه دادند که بر اساس تخمین گویای معادله Dispersion می‌باشد [۳۷]. در همین سال گروت و کلر یک شرایط مرزی غیرانعکاسی در مختصات کروی در حوزه فرکانس ارائه دادند که مختص به فضای سه بعدی می‌باشد [۳۸]. گیولی و نتا در سال ۲۰۰۳ با استفاده از شرایط مرزی هیگدان از شرایط مرزی مرتبه بالا در روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود بهره بردند [۳۹-۴۳]. در سال ۲۰۰۴ هاگستروم و واربرتون با استفاده از روش هیگدان، رابطه‌ای ارائه کردند که با مرتبه یکسان با شرایط مرزی گیولی و نتا، دقتی به مراتب بیشتر از آن دارا می‌باشد [۴۴]. در سال ۲۰۱۲ سمیعی و لطفی با استفاده از شرایط مرزی مرتبه بالا در مسئله انتشار امواج در مخزن نامحدود بهره برده و با بهبود دادن شرایط مرزی، مشکلات مربوط به حوزه فرکانس‌های کوچکتر از فرکانس مود اول مخزن را مرتفع و از آن در تحلیل دینامیکی سیستم سد و مخزن استفاده کردند [۴۵, ۴۶].

برای حل مشکل یافتن شرایط مرزی نسبتاً دقیق که بتوان آن را با هزینه محاسباتی مناسب به طور مستقیم در تحلیل در حوزه زمان به کار برد، روش‌هایی ارائه شده است که در آن‌ها تحلیل در حوزه فرکانس به عنوان یک مرحله میانی برای تحلیل در حوزه زمان در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی غیرانعکاسی گویا یکی از این روش‌های می‌باشد که در آن رابطه‌ای برای بخش نامحدود مسئله در حوزه

فرکانس به دست آمده است و به وسیله یک سیستم گویا تخمین زده شده و رابطه حاکم بر سیستم در تحلیل در حوزه زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۹۴ و بر از شرایط مرزی غیر انعکاسی گویا برای مدلسازی انتشار امواج در انتهای مخزن استفاده نموده است [۴۷]. در سال ۱۹۹۷ فلتترین شرایط مرزی گویا را در تحلیل اندرکنش سیستم سد-مخزن-سنگ پی به کار گرفته است [۴۸].

لایه‌های جاذب امواج دسته دیگری از شرایط مرزی تقریبی می‌باشند که با خصوصیات مکانیکی ویژه تعریف می‌گردند که امواج در حین عبور از آن مستهلک شده و دامنه آن‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. روش استخراج میرایی که توسط ولف و سانگ در سال ۱۹۹۴ ارائه گردیده است یکی از این روش‌ها می‌باشد که در آن بخش محدودی از محیط نیمه بینهایت مدلسازی می‌گردد و با اعمال میرایی مصنوعی بخش مدلسازی شده تبدیل به لایه جاذب امواج می‌گردد و بدین ترتیب تاثیر امواج منعکس شده از مرزهای مدل بر پاسخ سازه به حداقل رسیده و با استخراج میرایی مصنوعی، پاسخ مسئله مورد بررسی به دست می‌آید [۴۹]. در سال ۲۰۰۴ باسو و چوپرا روش استخراج میرایی را در آزمایش‌های عددی متنوع به کار گرفته و تاثیر انتخاب پارامترهای مختلف را در پاسخ سیستم مورد بررسی قرار دادند [۵۰]. در سال ۲۰۰۸ ژنگ و همکارانشان از روش استخراج میرایی برای تحلیل اندرکنش سدهای قوسی و سنگ پی استفاده کردند [۵۱].

لایه‌های کاملاً سازگار از دیگر روش‌های معرفی شده می‌باشد که دارای دو ویژگی زیر می‌باشد:

- اگر موجی به مرز دو لایه‌ی کاملاً سازگار برخورد کند بدون هیچ گونه انعکاسی از آن عبور می‌کند.
- در برخی راستاها دارای خاصیت کاهندگی می‌باشد و دامنه امواج منتشر شده در آن در آن راستاها کاهش می‌یابد.

با توجه به خصوصیتی که اشاره شد، اگر در مرز انقطاع مدل اجزاء محدود، از لایه‌های کاملاً تطبیق یافته استفاده شود، امواج بدون انعکاس وارد لایه‌های کاملاً تطبیق یافته شده و اگر ضخامت آن به میزان مناسب باشد، استهلاک محیط موجب مستهلک شدن دامنه امواج منتشر شده قبل از رسیدن به مرز انتهای مدل شده و سبب می‌گردد که انعکاس احتمالی تأثیری در پاسخ سیستم نداشته باشد. بدین ترتیب می‌توان با بهره گرفتن از لایه‌های کاملاً تطبیق یافته در مدلسازی میحط‌های نامحدود، شرط تشعشع را در سیستم اعمال کرد.

۱-۳- لایه‌های کاملا تطبیق یافته

در سال ۱۹۹۴ برنگر [۵] تکنیک جدیدی برای شبیه سازی فضای آزاد ارائه داد که مانند روش‌های ارائه شده در ۱۹۷۷ و ۱۹۸۳ توسط برنگر و روش ارائه شده در ۱۹۸۳ توسط هلند و ویلیامز بر اساس کاربرد لایه جاذب استوار بود با این تفاوت که در محیط تطبیق یافته ارائه شده (که برای جذب بدون انعکاس امواج الکترومغناطیس طراحی شده بود)، ضریب انعکاس تئوریک امواج برخورد کننده به لایه با هر فرکانس و زاویه‌ای صفر خواهد بود (در روش‌های قبلی این ضریب تنها در صورت قائم بودن زاویه برخورد صفر می‌گردید). لذا این لایه که احاطه کننده محدوده محاسباتی می‌باشد، به لحاظ تئوریک هر نوع موج برخورد کننده به مرزها را بدون انعکاس جذب نموده و از آن به عنوان لایه کاملا تطبیق یافته (PML) نام برده می‌شود.

۱-۴- فرمولاسیون لایه‌های PML در حوزه زمان

در این قسمت فرمولاسیون اجزاء محدود لایه‌های کاملا تطبیق یافته در حالت دو بعدی در حوزه زمان بر اساس نتایج تحقیقات باسو و چوپرا در سال ۲۰۰۳ [۵۲] و الگوریتم حل معادله دینامیکی با استفاده از روش حل ضمنی نیومارک که در برنامه تهیه شده توسط داودی و پوردیلمی [۵۳] در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله مورد استفاده قرار گرفته است، اشاره خواهد گردید.

در یک محیط الاستیک دو بعدی روابط حاکم بر لایه‌های کاملا تطبیق یافته به صورت روابط زیر ارائه شده است:

$$(\sigma \tilde{\Lambda}) \nabla = -\omega^2 \rho [\lambda_1(x_1) \lambda_2(x_2)] u \quad (1-1)$$

$$\bar{\sigma} = (1 + 2ia_0 \xi) C \bar{\varepsilon} \quad (2-1)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [(u \nabla^T) \Lambda + \Lambda^T (u \nabla^T)^T] \quad (3-1)$$

که در این روابط ω سرعت زاویه‌ای، ρ چگالی مصالح، ξ میرایی مصالح، λ_1 و λ_2 توابع توسعه دهنده، u تغییر مکان، ε کرنش، σ تنش، C ماتریس رفتاری و a_0 فرکانس بی بعد می‌باشد. روابط تنش، تغییر مکان و کرنش نیز به صورت روابط زیر می‌باشد:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix}, u = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}, \nabla = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \end{Bmatrix} \quad (4-1)$$

$$\bar{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_2 & 0 \\ 0 & \lambda_1 \end{bmatrix}, \Lambda = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_2} \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

توابع توسعه دهنده ارائه شده در این روابط به صورت زیر می‌باشند:

$$\lambda_i(x_i) = (1 + f_i^e(x_i)) - i \frac{f_i^p(x_i)}{a_0} \quad (6-1)$$

که بر اساس رابطه (۶-۱) رابطه (۵-۱) به صورت زیر قابل بازنویسی می‌باشد:

$$\bar{\Lambda} = \left(\bar{F}^e + \frac{1}{i\omega} \bar{F}^p \right) \Lambda = \left(F^e + \frac{1}{i\omega} F^p \right)^{-1} \quad (7-1)$$

$$\bar{F}^e = \begin{bmatrix} 1 + f_2^e(x_2) & 0 \\ 0 & 1 + f_1^e(x_1) \end{bmatrix}, \bar{F}^p = \begin{bmatrix} C_s f_2^p(x_2)/b & 0 \\ 0 & C_s f_1^p(x_1)/b \end{bmatrix} \quad (8-1)$$

$$F^e = \begin{bmatrix} 1 + f_1^e(x_1) & 0 \\ 0 & 1 + f_2^e(x_2) \end{bmatrix}, F^p = \begin{bmatrix} C_s f_1^p(x_1)/b & 0 \\ 0 & C_s f_2^p(x_2)/b \end{bmatrix} \quad (9-1)$$

که با ضرب طرفین رابطه (۱-۱) در $i\omega\Lambda^{-T}$ و Λ^{-1} و جایگذاری روابط بالا در رابطه‌های (۱-۱) الی (۳-۱) و تبدیل معکوس فوریه، معادلات حاکم بر لایه‌های کاملاً تطبیق یافته در حوزه زمان را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\text{div}(\bar{F}^e \sigma + \bar{F}^p \Sigma) = \rho f_m \ddot{u} + \rho \frac{C_s}{b} f_c \dot{u} + \frac{\mu}{b^2} f_k u \quad (10-1)$$

$$\sigma = C \left(\varepsilon + \frac{2\xi b}{C_s} \dot{\varepsilon} \right) \quad (11-1)$$

$$\begin{aligned} F^{eT} \dot{\varepsilon} F^e + (F^{eT} \varepsilon F^p + F^{pT} \varepsilon F^e) + F^{pT} E F^p \\ = \frac{1}{2} [F^{eT} (\text{grad}(\dot{u})) + (\text{grad}(\dot{u}))^T F^e] \\ + \frac{1}{2} [F^{pT} (\text{grad}(u)) + (\text{grad}(u))^T F^p] \end{aligned} \quad (12-1)$$

که در رابطه (۱۰-۱):

$$f_m = (1 + f_1^e(x_1))(1 + f_2^e(x_2)) \quad (13-1)$$

$$f_c = (1 + f_1^e(x_1))f_2^p(x_2) + (1 + f_2^e(x_2))f_1^p(x_1) \quad (14-1)$$

$$f_k = f_1^p(x_1)f_2^p(x_2) \quad (15-1)$$

$$\Sigma = \int_0^t \sigma d\tau, E = \int_0^t \varepsilon d\tau \quad (16-1)$$

با تعیین فرمولاسیون لازم برای لایه‌های کاملاً تطبیق یافته، نیاز به یک روش حل عددی مناسب با دقت قابل قبول جهت حل مسائل خواهیم داشت که در پروژه حاضر از روش ضمنی نیومارک استفاده گردیده است.

۱-۵- معرفی نرم افزار

این برنامه به منظور تحلیل پاسخ دینامیکی یا لرزه‌ای ساختگاه، با استفاده از روش اجزاء محدود تهیه گردیده است و قادر است انواع شکل‌های هندسی با تعداد لایه‌بندی‌های مختلف تحت بارگذاری دینامیکی و یا تحریک لرزه‌ای، در حوزه زمان را تحلیل نماید. ویژگی خاص این نرم افزار، قابلیت پیاده‌سازی لایه‌های کاملاً تطبیق یافته (PML) می‌باشد که توانایی مدل‌سازی میرایی هندسی را در انجام تحلیل‌ها به آن می‌افزاید. این برنامه بر اساس مطالعات صورت گرفته در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهیه گردیده است و دارای چندین تابع برای پیاده‌سازی بخش‌های مختلف روش اجزاء محدود می‌باشد که در صورت نیاز برای اطلاعات بیشتر در این خصوص می‌توانید مرجع [۵۳] را مورد مطالعه قرار دهید.

۱-۵-۱- ورودی‌های برنامه

با توجه به عدم المان بندی خودکار مدل معرفی شده در این نسخه از نرم افزار، داده‌های ورودی توسط کاربر به برنامه معرفی می‌شوند. این داده‌ها شامل هندسه مدل، شرایط مرزی، مشخصات مصالح و تحریک ورودی می‌باشد که در غالب فایل‌های متنی دریافت می‌گردد.

۱-۵-۲- الگوریتم حل برنامه

- برنامه تحلیل دینامیکی خطی با شروع از بدنه اصلی، فایل‌های مشخصات گره‌ها، المان‌بندی، خصوصیات محیط، شرایط مرزی، مشخصات PML، گام زمانی و مدت زمان تحلیل را خوانده و در متغیرها و ماتریس‌های متناسب ذخیره می‌کند.

- ارتباط بین المان‌ها و گره‌های مشترک تعیین و ذخیره می‌شود؛ همچنین، ابتدا و انتهای PML تعریف شده در کل مدل محاسبه می‌شود.
- درجات آزادی مربوط به گره‌های مقید و آزاد بر اساس فایل شرایط مرزی معرفی شده، تفکیک و جداگانه ذخیره می‌شود.
- هر المان با ویژگی مختص خود تشکیل و موارد ضروری همچون ماتریس سختی، جرم و میرایی آن ذخیره می‌شود. این مرحله برای تمامی المان‌های تشکیل دهنده‌ی مدل از جمله PML، نیز انجام می‌شود.
- عملیات سر هم کردن المان‌ها در دو بخش استاتیکی و دینامیکی (بر اساس ویژگی‌های PML) صورت می‌پذیرد.
- به منظور کاهش حجم فضای حافظه مورد نیاز، با استفاده از دستور Sparse، درایه‌های غیر صفر در ماتریس‌های سختی، جرم و میرایی و بردار نیروهای حجمی وزن به طور مناسبی ذخیره می‌شود.
- تحلیل استاتیکی برای تنش‌های برجا انجام شده و در نهایت، نیروهای داخلی به وجود آمده در محیط ذخیره می‌شود.
- تاریخچه زمانی تحریک ورودی خوانده می‌شود و در گره‌های مورد نظر به درجات آزادی تعیین شده اعمال می‌شود.
- مقداردهی اولیه به متغیرها (ماتریس‌ها و بردارها) انجام می‌شود. در این مرحله، مواردی همچون تغییر مکان، سرعت و شتاب کلیه المان‌ها و نیروی داخلی، تنش و کرنش مربوط به المان‌های PML برابر با صفر قرار داده می‌شوند.
- ثابت‌های روش ضمنی نیومارک، مقداردهی شده و سختی مماسی محاسبه می‌شود.
- شرایط مرزی از طریق سطر و ستون‌های مربوط به آن در ماتریس سختی مماسی اعمال می‌شود.
- حلقه زمانی برای انجام تحلیل دینامیکی آغاز می‌شود (با توجه به گام زمانی و مدت تحلیل).
- نیروی داخلی در المان‌های PML با توجه به خصوصیات و همچنین تنش و کرنش به وجود آمده در آن، برای این گام زمانی محاسبه می‌شود.

- سر هم کردن نیروهای داخلی در المان‌های PML انجام و به صورت اسپارس ذخیره می‌شود.
- حلقه تکرار نیوتن-رافسون برای همگرا نمودن جواب که در اینجا تغییر مکان، سرعت و شتاب است، انجام می‌پذیرد. معیار هم‌گرایی تکرارهای تعادلی، براساس نیروی نامتوازن کنترل می‌شود.
- تنش و کرنش در المان‌های PML با توجه به خصوصیات آن و همچنین محاسبات مراحل قبل، برای این گام زمانی محاسبه می‌شود.
- پس پردازش برای محاسبه تنش‌های حاصل از تحلیل دینامیکی انجام می‌گیرد.
- نتایج خروجی در قالب فایل متنی و یا به صورت کانتور و نمودار ارائه می‌گردد.

۱-۵-۳- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی و اطمینان از کارایی برنامه تهیه شده، بررسی و مقایسه نتایج ۳ مساله ساده مد نظر قرار گرفته است.

- در مساله اول، سرعت امواج فشاری، برشی و ریلی در مدل‌سازی انجام شده، محاسبه شده و با مقدار تئوریک آن مقایسه گردیده است.
- در مساله دوم، بزرگنمایی امواج مهاجم به یک سد با هندسه ساده بررسی شده است.
- در مساله سوم، تشکیل امواج سطحی در لایه نیمه بینهایت به کمک PML مدل‌سازی شده است.

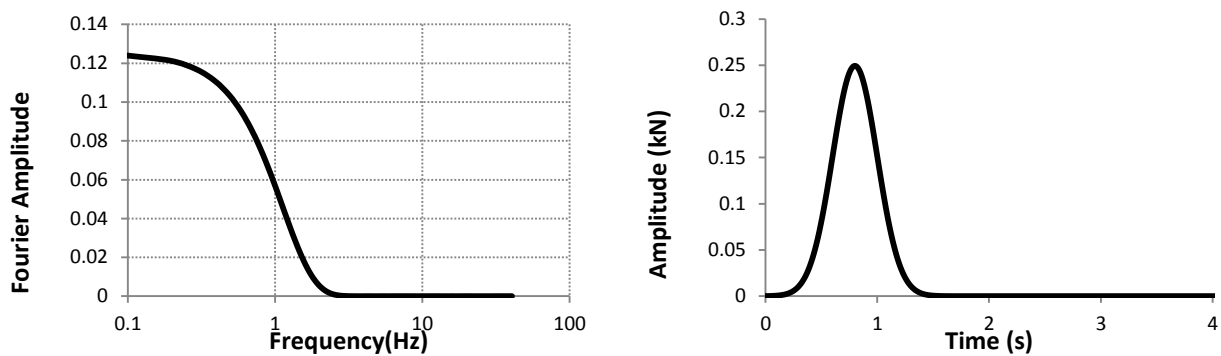
۱-۵-۳-۱- مساله اول: محاسبه سرعت موج انتشار یافته در محیط

در این مسئله، به منظور اطمینان اولیه از عملکرد دینامیکی برنامه، نمونه‌ای از مدل کرنش مسطح در نظر گرفته شده. یک بار نقطه‌ای قائم به صورت موج تابع توزیع احتمال نرمال (Normal Probability Distribution) که در سطح آن و در مرکز مدل واقع گردیده است، به محیط اعمال شده و نحوه‌ی انتشار موج و به عبارت دیگر، سرعت موج فشاری و ریلی اندازه‌گیری شده است. تابع توزیع نرمال در معادله زیر ارائه شده است.

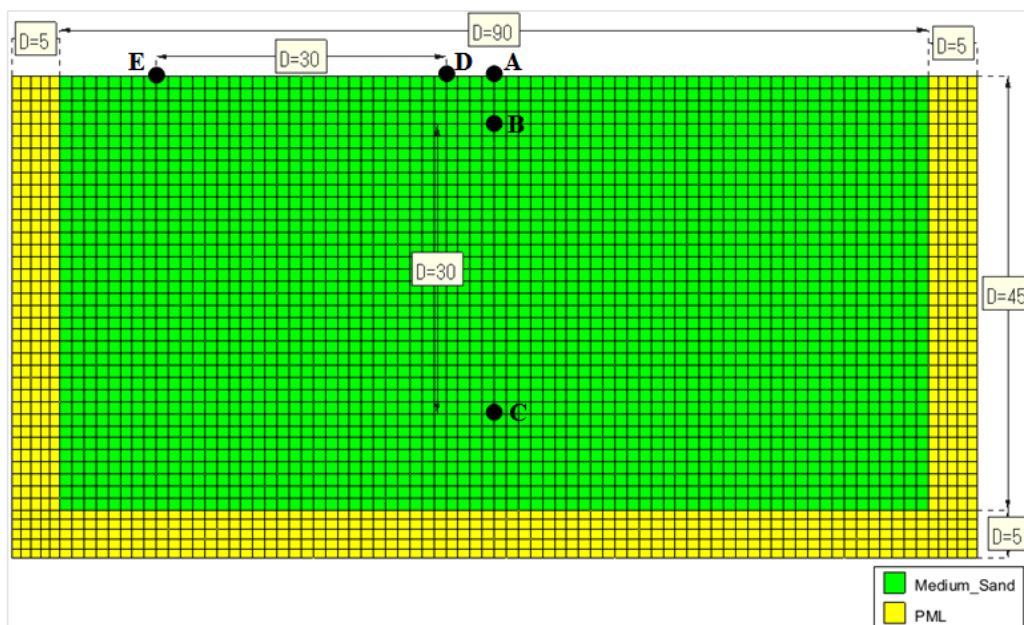
$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad \sigma = 0.16 \ \& \ \mu = 0.8$$

که در آن t لحظه زمانی بارگذاری است؛ موج تابع توزیع احتمال نرمال همانند آنچه در شکل (۱-۵-۱) نمایش داده شده می‌باشد که به صورت نیروی قائم بر سطح و مرکز مدل وارد می‌شود. گام زمانی در تمامی مسائل پیش رو برابر با 0.01 در نظر گرفته شده است مگر آنکه به صراحت مقدار دیگری برای آن یاد شود.

مدل در نظر گرفته شده، یک محیط الاستیک خطی به ابعاد 100 متر در 50 متر است که به کمک اجزای $1/25$ متری، المان‌بندی شده است (شکل (۱-۵-۲)). خصوصیات این محیط نیز در جدول (۱-۵-۱) آورده شده است.



شکل (۱-۵-۱): موج ورودی در نقطه A برای اندازه گیری سرعت موج



شکل (۱-۵-۲): المان بندی محیط به منظور اندازه گیری سرعت امواج

جدول (۱-۵-۱): خصوصیات رفتاری در نظر گرفته شده برای محیط انتشار امواج قائم و رایی

میرایی مصالح (%)	نسبت پواسون	دانسیته (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (kN/m ²)
0	0.33	1800	2992.96

با استفاده از رابطه‌ی تئوری الاستیسیته، سرعت انتشار موج فشاری و موج برشی به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{2992.96(1-0.33)}{1800(1+0.33)(1-2 \times 0.33)}} = 49.6 \text{ m/s}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.9 \times 10^6}{2(1+0.33) \times 1800}} = 25 \text{ m/s}$$

همچنین، مقدار تئوری سرعت موج رایی از رابطه زیر قابل محاسبه است (Freund, 1998):

$$V_r = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \times V_S = \frac{0.862 + 1.14 \times 0.33}{1 + 0.33} \times 25 = 23.27 \text{ m/s}$$

علاوه بر این، سرعت انتشار موج رایی با حل معادلات انتشار موج در محیط الاستیک و یافتن رابطه میان سرعت موج برشی و رایی قابل تخمین است. برخی از مقادیر نسبت V_r/V_S به ازای ضرایب مختلف پواسون در جدول (۱-۵-۲) ارائه شده است که برای مسأله حاضر ($\nu=0.33$) داریم:

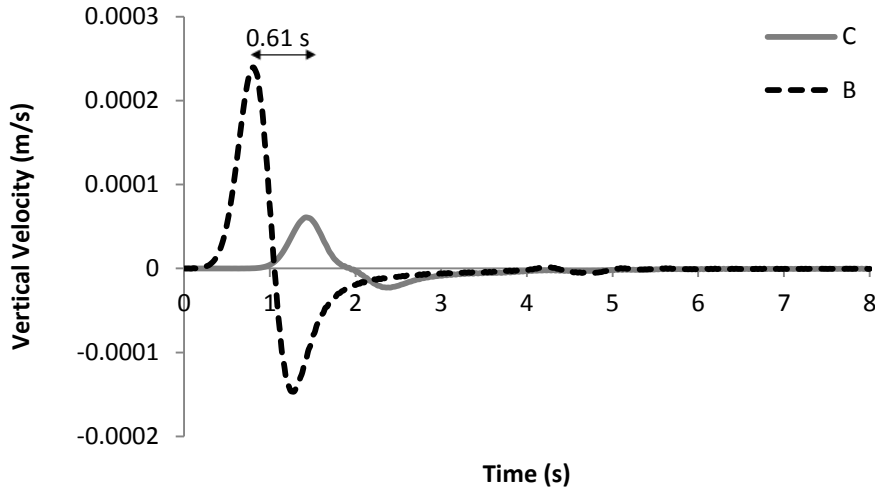
$$V_r = 0.933V_S = 23.33 \text{ m/s}$$

جدول (۱-۵-۲): مقادیر نسبت سرعت موج رایی به موج برشی به ازای پواسون‌های مختلف [۵۴]

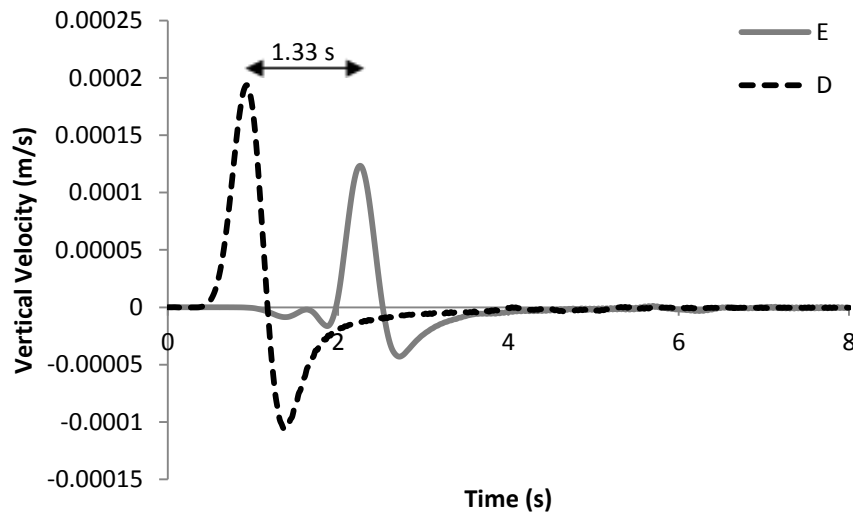
ν	V_r/V_S
0.25	0.919
0.29	0.926
0.33	0.933
0.4	0.943
0.5	0.955

با مشخص نمودن دو نقطه در عمق مدل و دو نقطه بر روی سطح آن و پایش تغییر مکان در این نقاط بر حسب زمان، می‌توان با داشتن فاصله‌ی بین این دو نقطه و ثبت زمان مربوط به رسیدن به پیک جابجایی در این نقاط، سرعت انتشار موج در محیط مدل را محاسبه نمود. این مطلب برای امواج حجمی و سطحی، به ترتیب در شکل (۱-۵-۳) و شکل (۱-۵-۴) نشان داده شده است. بدین ترتیب سرعت

موج فشاری و رایلی به ترتیب برابر با $49/18$ و $22/56$ متر بر ثانیه به دست آمده است که نتیجه‌ی حاصل از برنامه با تئوری الاستیسیته تطابق مناسبی دارد.

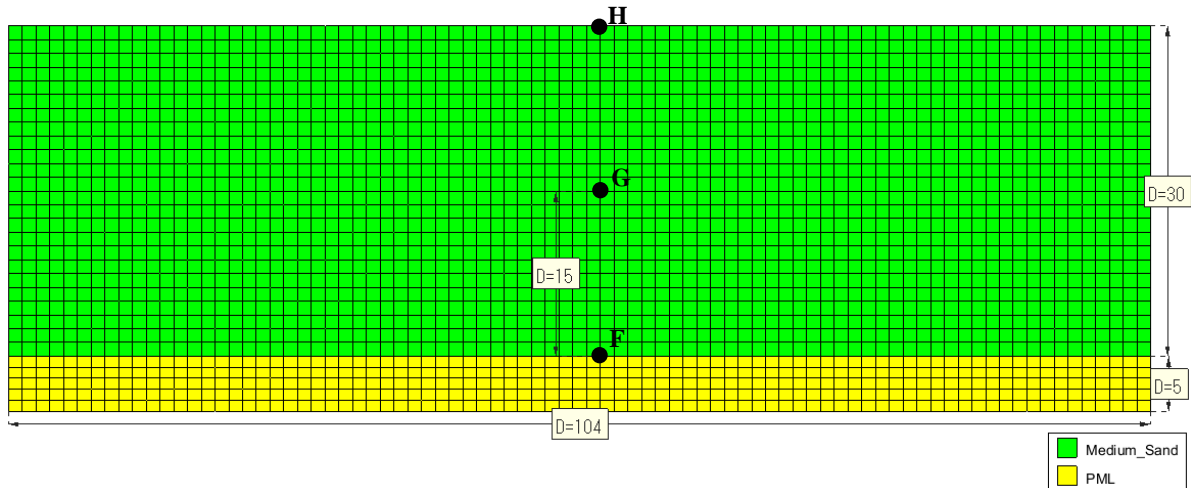


شکل (۱-۵-۳): سرعت قائم ثبت شده در دو نقطه به فاصله ۳۰ متر در عمق مدل



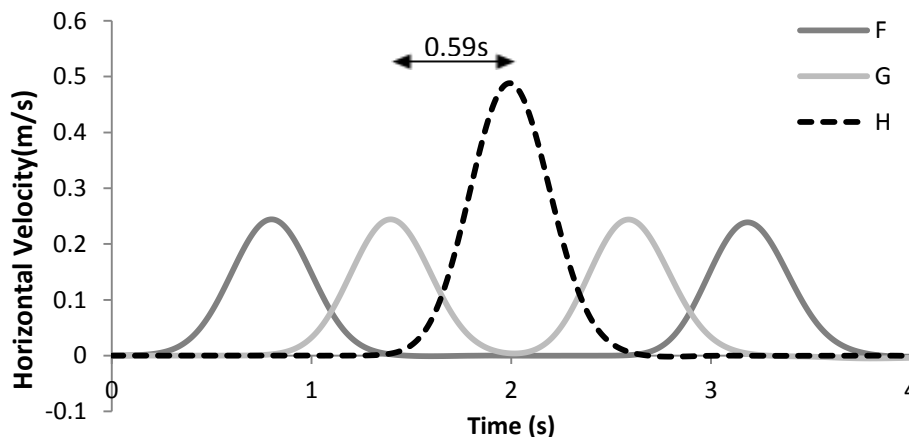
شکل (۱-۵-۴): سرعت قائم ثبت شده در دو نقطه به فاصله ۳۰ متر بر روی سطح مدل

به منظور مقایسه سرعت موج برشی در محیط، این بار با اعمال شتابنگاشت افقی از کف مدل در قالب همان موج توزیع احتمال نرمال قبل، به محاسبه سرعت موج برشی پرداخته شده است. بدین منظور با فرض وجود سنگ بستر صلب در عمق ۳۰ متری با PML به ضخامت ۵ متر، تحریک از این عمق وارد می‌گردد (شکل (۱-۵-۵)).



شکل (۱-۵-۵): المان بندی در مدل سازی انتشار موج عرضی از کف

خروجی حاصل از تحریک از کف، در شکل ۶ نشان داده شده است. همانند آنچه پیشتر توضیح داده شد، سرعت موج برشی برابر با $25/4$ متر بر ثانیه به دست آمده است که نتیجه‌ی حاصل از برنامه با تئوری الاستیسیته تطابق مناسبی دارد.



شکل (۱-۵-۶) جابجایی افقی ایجاد شده در دو نقطه در عمق به فاصله ۱۵ متر

۱-۵-۳-۲- مساله دوم: بزرگنمایی امواج در بدنه سد

در تحقیق انجام گرفته توسط Abouseeda & Dakoulas در سال ۱۹۹۶ [۵۵]، با استفاده از روش ترکیبی اجزا محدود-اجزا مرزی در حوزه فرکانس، مقدار بزرگنمایی حاصل از انتشار موج P و SV در بدنه سد بررسی شده است. قسمتی از نتایج به دست آمده از کار محققین یاد شده که به مدل سازی سد مثلثی با شالوده صلب تحت اثر موج هارمونیک می پردازد به عنوان معیار صحت سنجی نرم افزار حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

سد همگن مثلثی به ارتفاع ۱۰۰ متر با شیب ۲:۱ (عرض کف برابر با ۴۰۰ متر) و رفتار ویسکوالاستیک خطی با شرایط کرنش مسطح دارای خصوصیات مندرج در جدول (۳-۵-۱) در نظر گرفته شده است.

جدول (۳-۵-۱): خصوصیات رفتاری در نظر گرفته شده برای بدنه سد [۵۵]

میرایی مصالح (%)	سرعت موج برشی (m/s)	نسبت پواسون	دانشسته (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (kN/m ²)
10	400	0.333	1920	8.19e5

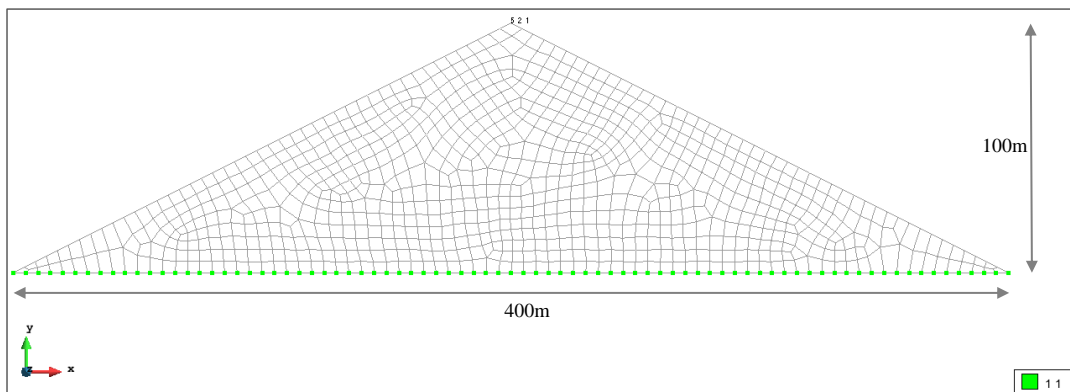
ضریب بزرگنمایی به صورت قدر مطلق نسبت تغییر مکان در سد به تغییر مکان تحریک ورودی تعریف شده و در نهایت، در مقابل عدد بی بعد فرکانس ترسیم می شود. عدد بی بعد فرکانس برای این مساله به صورت زیر معرفی شده است:

$$a_0 = \frac{\omega H}{C_d}$$

که در آن، ω سرعت زاویه ای، H ارتفاع سد و C_d سرعت موج برشی در بدنه سد می باشد.

تحریک ورودی به صورت تاریخچه زمانی موج سینوسی در دو حالت موج افقی (SV) و موج قائم (P) به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است.

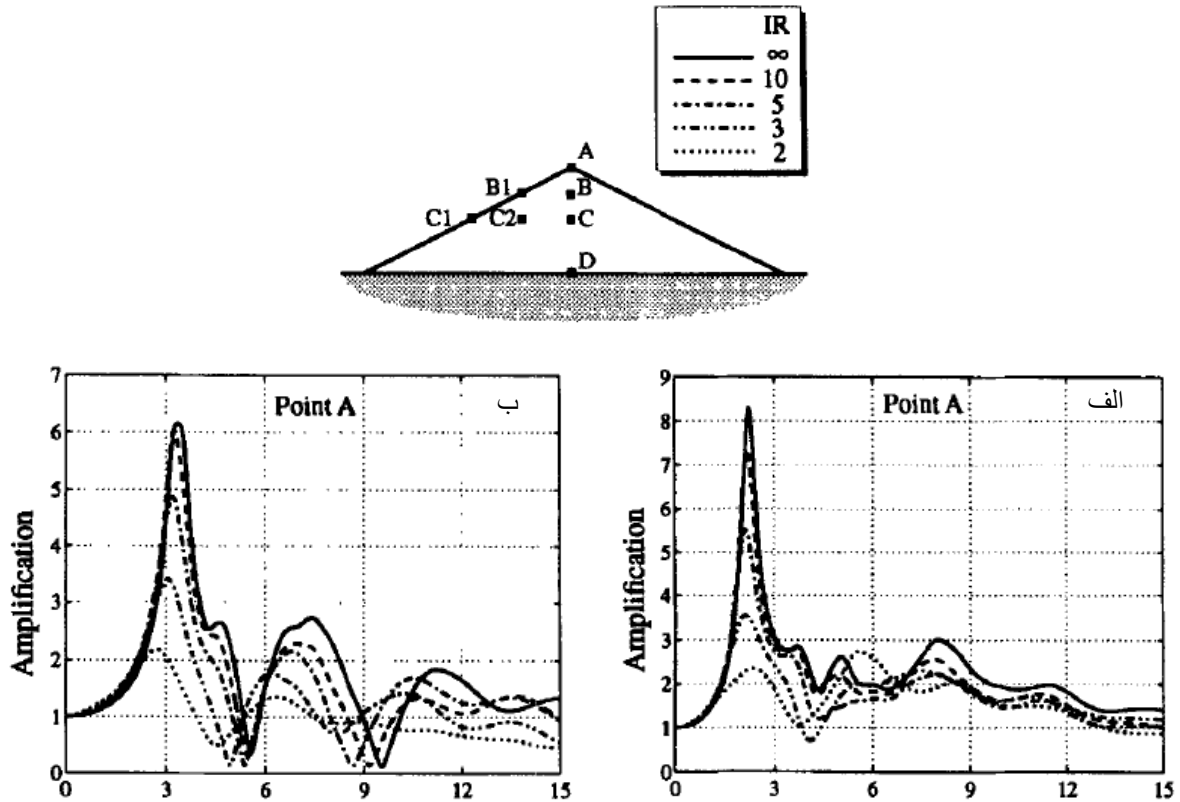
در شکل (۷-۵-۱) المان بندی به کار گرفته شده در تحلیل حاضر نمایش داده شده است که در آن شالوده سد به صورت صلب (گیردار در دو جهت افقی و قائم) می باشد.



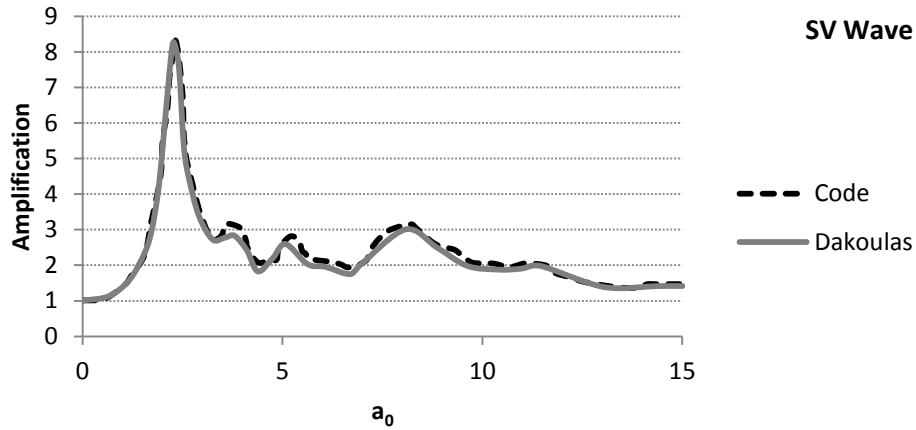
شکل (۷-۵-۱): المان بندی در نظر گرفته شده برای تحلیل در برنامه

در شکل (۱-۵-۸) قسمتی از نتایج تحقیق ارائه شده توسط Abouseeda & Dakoulas (1996) نشان داده شده است و در شکل (۱-۵-۹) و شکل (۱-۵-۱۰) نتایج حاصل از تحلیل حاضر برای نقطه واقع در تاج سد، ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج این دو بررسی به هم نزدیک بوده و تفاوت موجود در آن‌ها، ناشی از نوع المان‌بندی و تحلیل در حوزه فرکانس و زمان می‌باشد.

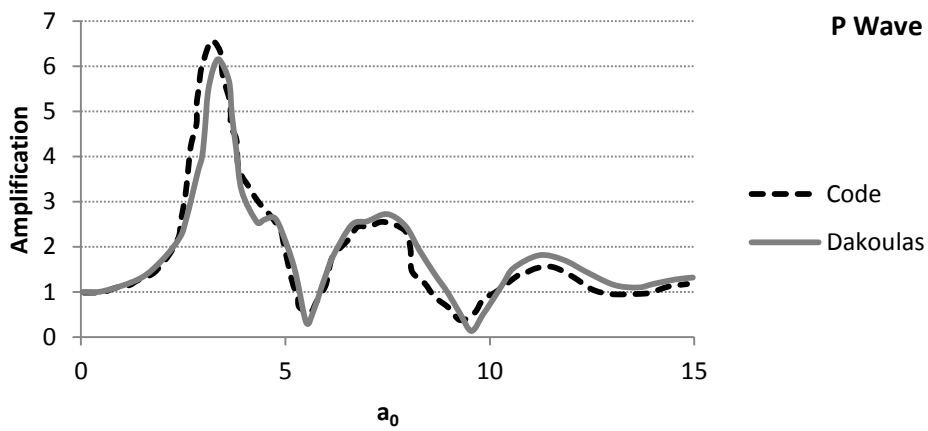
EFFECT OF IMPEDANCE RATIO



شکل (۱-۵-۸): بزرگنمایی به دست آمده از مطالعه Abouseeda & Dakoulas (1996): الف) موج مهاجم SV ب) موج مهاجم P



شکل (۹-۵-۱): بزرگنمایی افقی برای تاج سد تحت اثر موج مهاجم SV

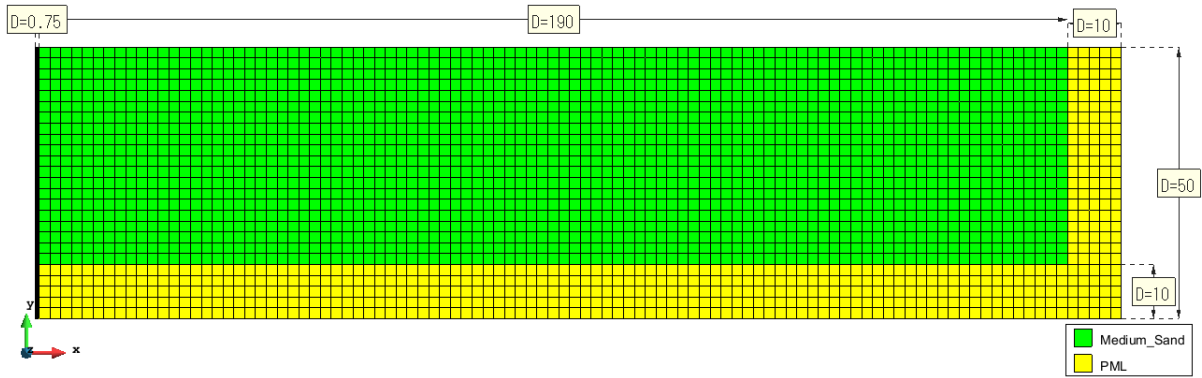


شکل (۱۰-۵-۱): بزرگنمایی افقی برای تاج سد تحت اثر موج مهاجم P

۱-۵-۳-۳- مساله سوم: کارایی PML در مدل‌سازی انتشار امواج سطحی

در این بخش، امواج سطحی بر روی نیم فضای الاستیک در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر، امواج سطحی توسط جابجایی از پیش تعیین شده هارمونیک تولید می‌شود و نتایج حاصل با تحقیق Chouw & Schmid در سال ۱۹۹۱ [۵۶] که با استفاده از روش اجزا مرزی انجام گرفته، مقایسه شده است.

در این مساله به علت تقارن، تنها نصف هندسه مدل‌سازی شده که المان‌بندی آن برای شرایط کرنش مسطح در شکل (۱۱-۵-۱) نشان داده شده است. همچنین، خصوصیات محیط در جدول (۴-۵-۱) درج شده است.



شکل (۱-۵-۱۱): المان بندی اجزا محدود در برنامه برای حل مسأله تشکیل موج سطحی

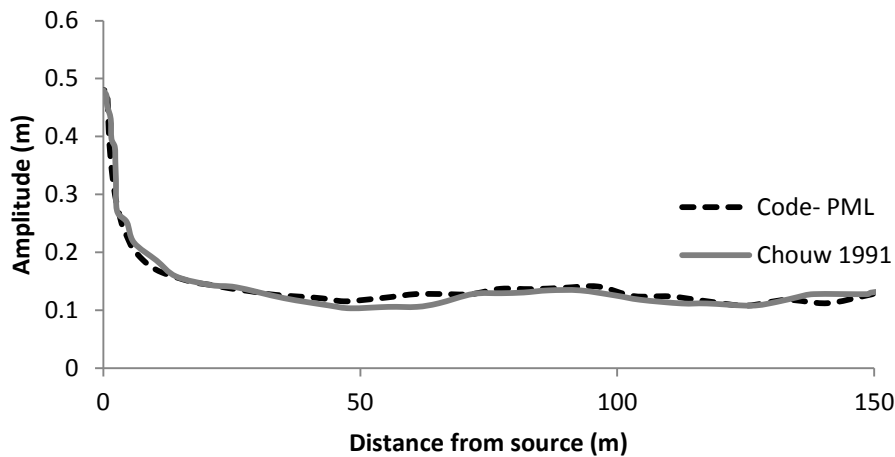
جدول (۱-۵-۴): خصوصیات رفتاری در نظر گرفته شده برای نیم فضای الاستیک *Chouw & Schmid* (1991)

میرایی مصالح (%)	نسبت پواسون	وزن مخصوص (kN/m ³)	مدول برشی (kN/m ²)
0	0.33	17.64	53280

ضعف روش اجزاء محدود در مدل‌سازی فضای نامحدود با کمک PML برطرف شده و در اینجا از آن برای شبیه‌سازی دامنه بی‌نهایت استفاده شده است. لایه کاملاً تطبیق یافته در ضلع راست و کف مدل همانگونه که در شکل (۱-۵-۱۱) نشان داده شده، به کار گرفته شده است. لازم به ذکر است یک تابع خطی به عنوان میراکننده در محیط PML با میرایی داخلی ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

جابجایی از پیش تعیین شده به صورت موج هارمونیک با دامنه ۰/۴۸ متر و فرکانس ۵ هرتز در عرضی برابر با ۰/۷۵ متر اعمال گردیده است.

نتایج حاصل از تحلیل شامل دامنه جابجایی در فواصل مختلف از منبع بارگذاری برای دو مطالعه به روش اجزاء مرزی و اجزاء محدود همراه با لایه‌های PML در شکل (۱-۵-۱۲) ارائه شده است. همانگونه که مشخص است نتایج تطابق خوبی داشته و برنامه نوشته شده قادر به مدل‌سازی امواج سطحی نیز می‌باشد.

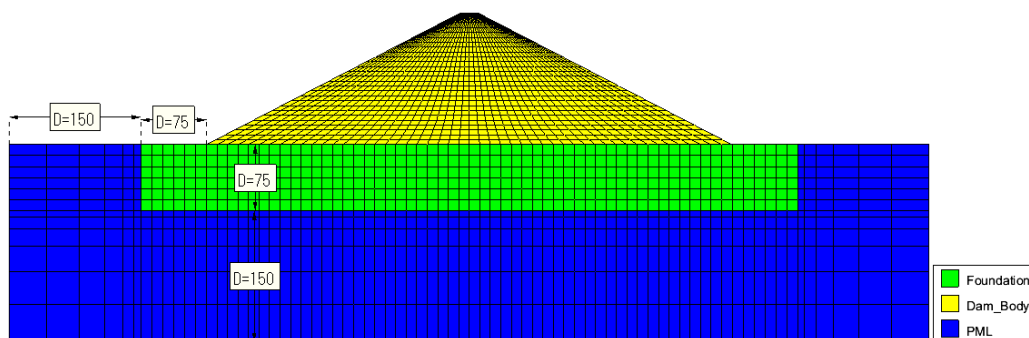


شکل (۱-۵-۱۲): دامنه جابجایی در فواصل مختلف از منبع بارگذاری

همانگونه که در این قسمت مشاهده نمودید، نتایج مدل‌های بررسی شده انطباق خوبی با مراجع دارا می‌باشد و جهت بررسی بیشتر نتایج می‌توانید نتایج تحقیقات انجام گرفته در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله [۵۳] را مطالعه فرمایید.

۱-۵-۳-۴- صحت سنجی نتایج نرم افزار حاضر با سایر نرم افزارها

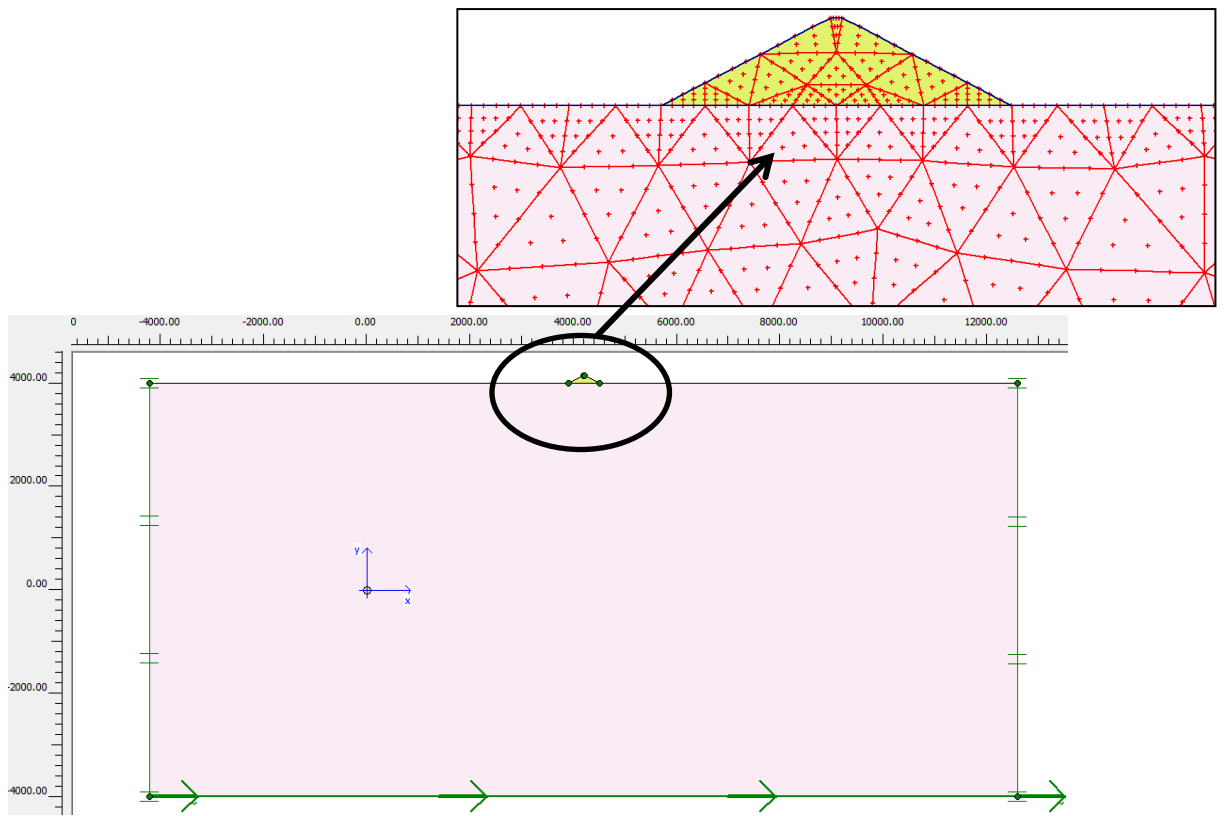
به منظور بررسی بیشتر نتایج به دست آمده از نرم‌افزار حاضر، صحت نتایج آن با مدل‌هایی در نرم-افزارهای تجاری همچون آباکوس^۱ و پلکسیس^۲ که به منظور حذف اثرات بازگشت موج از مرزها به صورت Extended Mesh مدل شده‌اند، مقایسه گردیده است که در ادامه ملاحظه می‌نمایید.



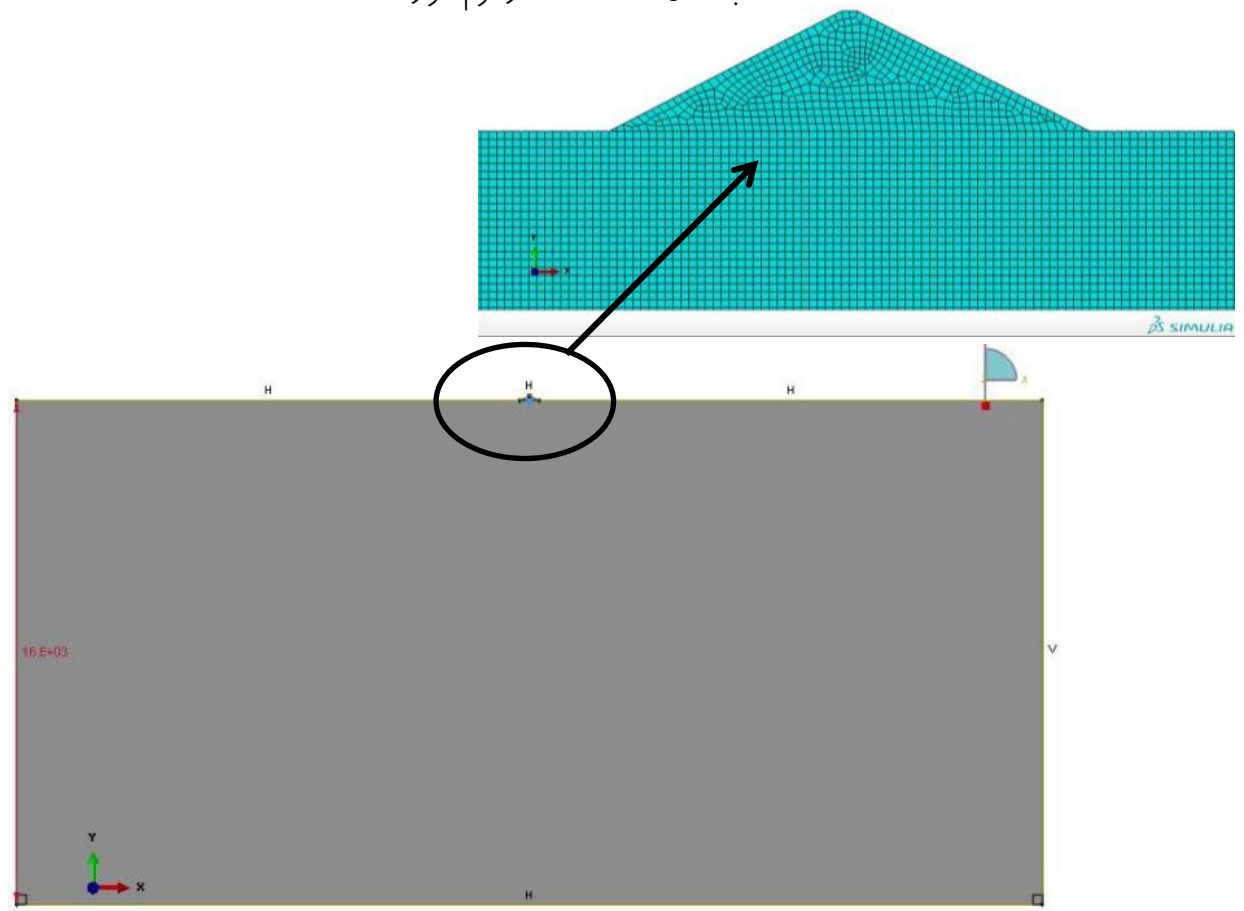
الف: مدل استفاده شده در نرم افزار IDAMP

¹ Abaqus

² Plaxis

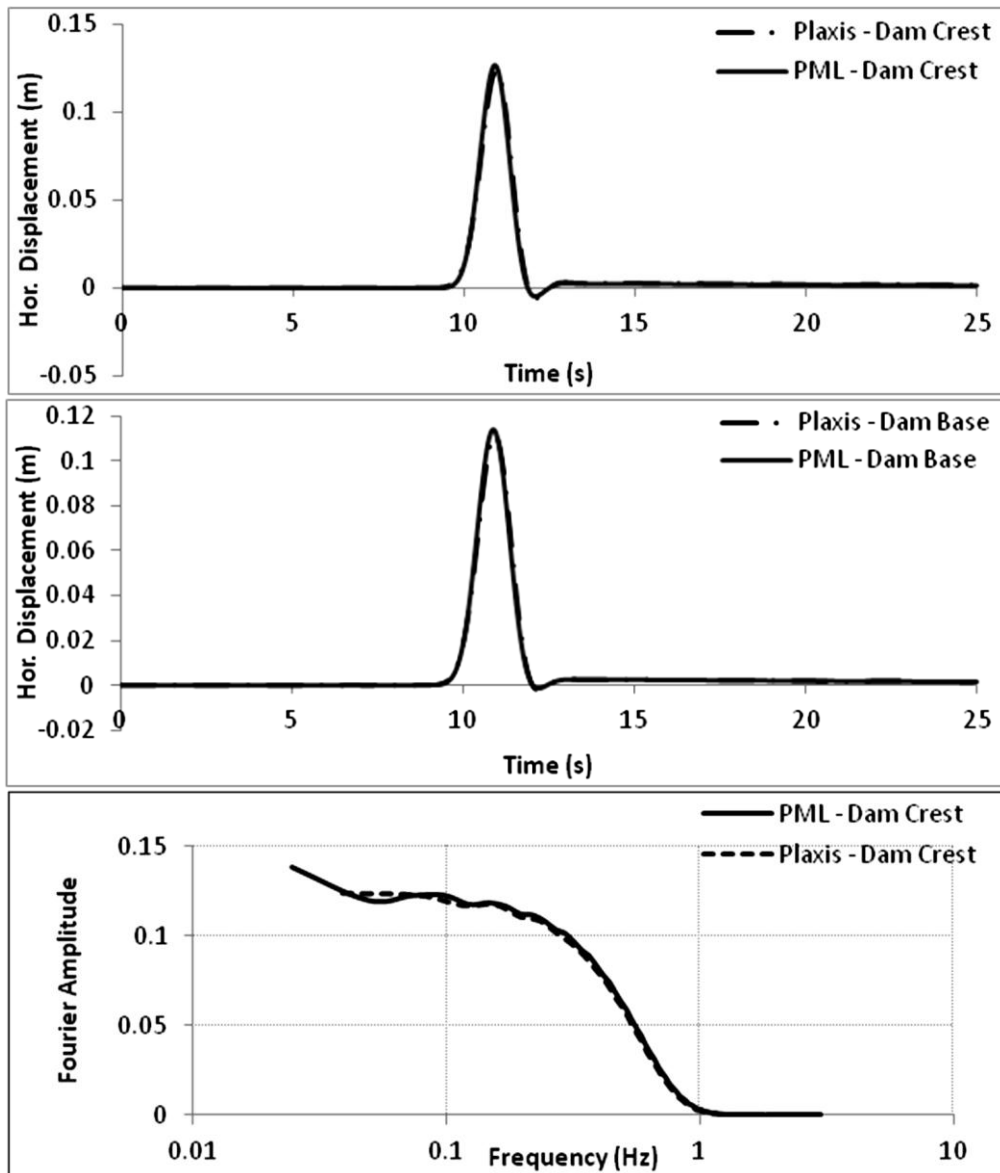


ب: مدل استفاده شده در نرم افزار Plaxis

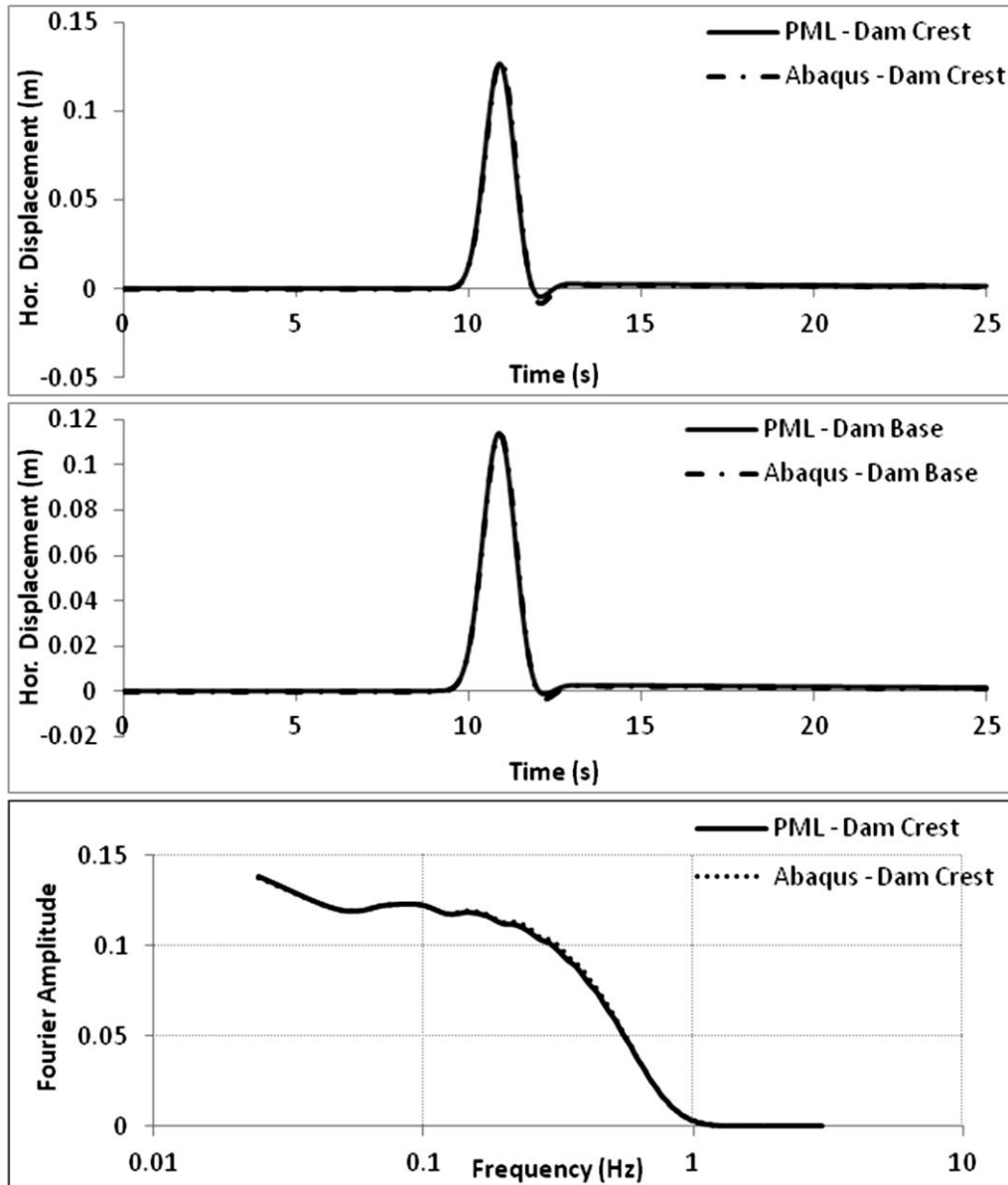


ج: مدل استفاده شده در نرم افزار Abaqus

شکل (۱-۵-۱۳): مدل‌های استفاده شده به منظور صحت سنجی



شکل (۱-۵-۱۴): مقایسه نتایج نرم افزار *Plaxis* و *IDAMP*



شکل (۱-۵-۱): مقایسه نتایج نرم افزار IDAMP و Abaqus

همانگونه که قابل مشاهده است، ابعاد مدل‌های استفاده شده در Plaxis و Abaqus در مقایسه با آنچه که در نرم افزار IDAMP استفاده گردیده است، بسیار بزرگتر می‌باشد که این باعث افزایش زمان تحلیل در این نرم افزارها و همچنین محدودیت‌های سخت افزاری همچون حافظه در دسترس به منظور انجام چنین تحلیل‌های سنگینی می‌شود. همچنین بر اساس آنچه در نمودارها نشان داده شده است، نتایج به دست آمده از این نرم افزارها انتطابق خوبی هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس دارا می‌باشد.

* لازم به یادآوری است که صحت‌سنجی نرم‌افزار حاضر با مثال‌های متعدد در قالب پروژه‌های پژوهشی در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله صورت گرفته است، با این وجود تیم پژوهشی پدیدآورنده نرم‌افزار عملکرد عاری از خطای آن را تضمین نمی‌کند. لذا کاربران پذیرفته‌اند که این نرم‌افزار به منظور تامین اهداف تحقیقاتی تهیه گردیده است؛ مسئولیت استفاده از داده‌های خروجی و همچنین اطمینان از صحت نتایج بر عهده کاربران بوده و پدیدآورندگان هیچگونه تعهدی در این خصوص نمی‌پذیرند. پیشنهاد می‌شود خروجی‌های این نرم‌افزار به منظور استفاده در پروژه‌های صنعتی با نتایج سایر نرم‌افزارها نیز کنترل گردد.

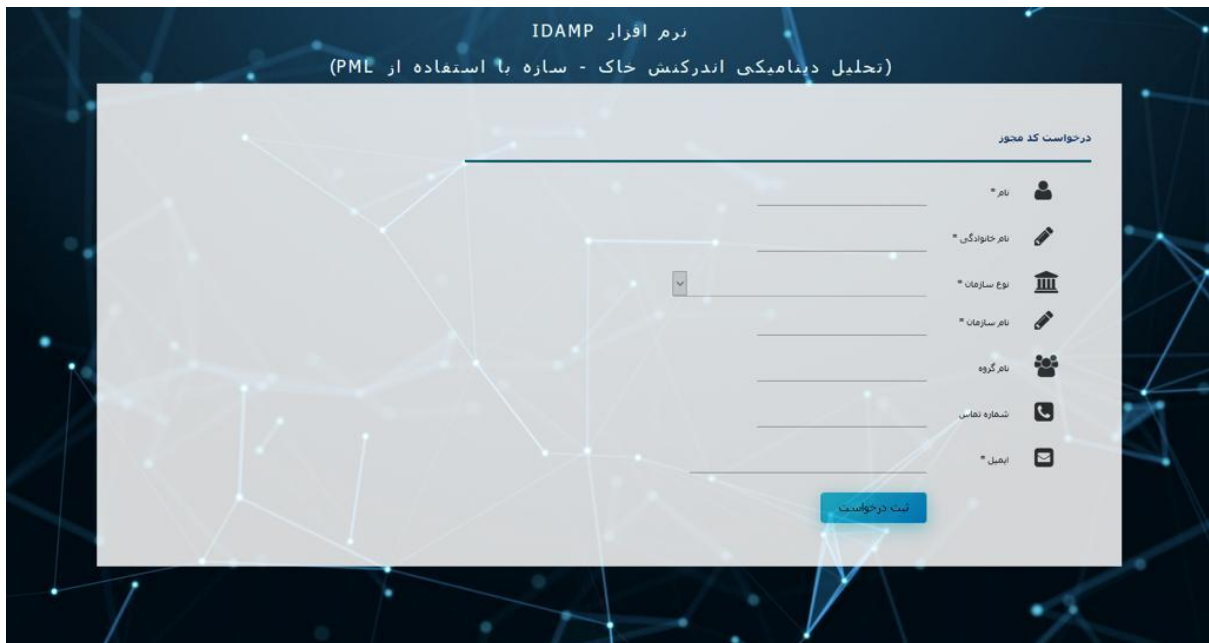
۲- بخش دوم: راهنمای کاربردی

۲-۱- ورود به برنامه

گام اول در استفاده از نرم افزار IDAMP ثبت نام در سایت و دریافت کد مجوز می باشد. ثبت نام شامل اطلاعات کلی کاربر بوده و پس از اتمام ثبت نام پست الکترونیکی حاوی کد مجوز ارسال خواهد گردید. نمای کلی این صفحه در شکل (۲-۱-۱) نشان داده شده است. با دریافت این کد مجوز قادر خواهید بود وارد مراحل بعدی گردید.

توجه داشته باشید که این کد مجوز یکبار مصرف بوده و با یکبار استفاده از آن و بارگذاری اطلاعات و ثبت درخواست دوباره نمی توانید از آن استفاده نمایید. همچنین توجه به این نکته نیز ضروری است که این کد مجوز پس از ارسال، فقط تا ۷۲ ساعت اعتبار خواهد داشت و پس از آن دوباره باید برای دریافت کد مجوز جدید، ثبت نام انجام دهید. شایان ذکر می باشد که با توجه به ترافیک موجود در سایت ممکن است کد مجوز بلافاصله پس از ثبت نام ارسال نگردد و لذا این امکان وجود دارد بر اساس ترافیک و اولویت متقاضیان، در صف انتظار قرار بگیرید.

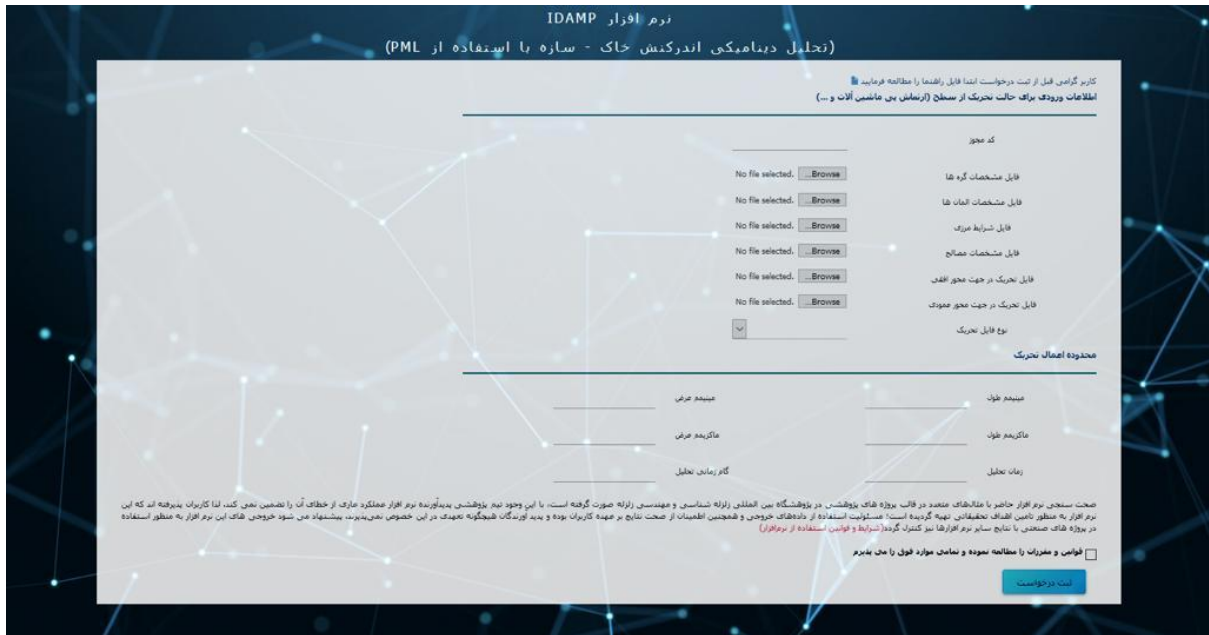
محدودیتی برای دریافت چندین کد برای کاربران در این مرحله وجود ندارد و می توانید پس از اتمام تحلیل و یا به طور همزمان چند درخواست ثبت نمایید. در صورت درخواست تعداد زیاد تحلیل ها می-توانید با تیم پشتیبانی تماس و درخواست خود را مطرح نمایید.



شکل (۲-۱-۱): نمای کلی صفحه ثبت نام

پس از دریافت پست الکترونیک حاوی کد مجوز، می‌توانید وارد صفحه ورود اطلاعات گردید. بدین منظور دو نوع تحلیل قابل انجام می‌باشد، یکی تحلیل به صورت تحریک از سطح (همچون تحریک پی ماشین آلات و ...) و دیگری به صورت تحلیل تحریک از مرزها (همچون تحریک ناشی از زلزله و ...).

به منظور انجام تحلیل به صورت تحریک از سطح، مطابق آنچه که در شکل (۲-۱-۲) مشاهده می‌نمایید، بایستی اطلاعاتی همچون فایل مشخصات گره‌ها، فایل مشخصات المان‌ها، فایل مشخصات گره-های مرزی، فایل مشخصات مصالح مورد استفاده، فایل تحریک در جهت افقی و عمودی و نیز مشخصات محدوده اعمال این تحریک‌ها را مشخص نمایید که هر یک از این ورودی‌ها در ادامه معرفی خواهند گردید.



شکل (۲-۱-۲): صفحه ورود اطلاعات تحریک از سطح

به منظور انجام تحلیل به صورت تحریک از کف، مطابق آنچه که در شکل (۲-۱-۳) مشاهده می‌نمایید، بایستی اطلاعاتی همچون فایل مشخصات گره‌ها، فایل مشخصات المان‌ها، فایل مشخصات گره-های مرزی، فایل مشخصات مصالح مورد استفاده، فایل تحریک در جهت افقی و عمودی و نیز عمق سنگ بستر لرزه‌ای را مشخص نمایید که هر یک از این ورودی‌ها در ادامه معرفی خواهند گردید.



شکل (۲-۱-۳): صفحه ورود اطلاعات تحریک از کف

در این صفحات معرفی شده:

- کد مجوز همان کدی است که پس از ثبت نام توسط پست الکترونیک ارسال گردیده است.

- فایل مشخصات گره‌ها، یک فایل متنی text می‌باشد که شامل سه ستون بوده و هر سطر آن مشابه آنچه که در فایل نمونه ارائه گردیده است به صورت زیر تعیین می‌گردد:

مختصات در راستای قائم مختصات در راستای افقی شماره گره

به عنوان مثال:

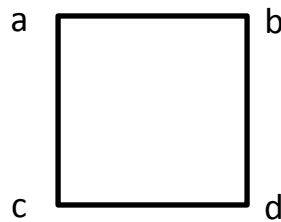
1	0	0
2	0	1
3	1	1
4	1	0

- فایل مشخصات المان‌ها، یک فایل text می‌باشد که حاوی ۷ ستون می‌باشد. هر سطر از این فایل به منظور تعریف یک المان مورد استفاده قرار می‌گیرد که حاوی اطلاعات زیر می‌باشد:

شماره المان	گره اول	گره دوم	گره سوم	گره چهارم	نوع مصالح	نوع المان
Element_Number	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Medium Layer Number	Medium / PML

- شماره المان یک عدد طبیعی می‌باشد.
- ستون‌های دوم تا پنجم نشانگر گره‌های تشکیل دهنده المان می‌باشند. توجه به این نکته ضروری است که در نسخه حاضر، المان‌ها بایستی از نوع چهار گرهی مشابه شکل (۲-۱-۴) باشند و نحوه ورود شماره گره‌ها به ترتیب برای تمام المان‌ها بایستی یا به صورت پادساعتگرد انجام پذیرد و از ورود تصادفی شماره گره‌ها بپرهیزید.
- ستون ششم شماره مصالحی تعریف شده در فایل ورودی مشخصات مصالح می‌باشد که در ادامه معرفی خواهد گردید. در این قسمت بایستی با توجه به نوع مصالح المان مربوطه شماره مصالح تشکیل دهنده آن وارد گردد.

- در ستون هفتم بایستی نوع المان تعریف گردد. با توجه به اینکه الگوریتم حل مسایل در المان‌های لایه‌های خاک و لایه‌های کاملاً تطبیق یافته (PML) متفاوت می‌باشد لذا لازم است تا نوع هر المان به درستی تعریف گردد. این ستون می‌تواند شامل دو مقدار ۱ برای المان‌های تشکیل دهنده لایه‌های خاک و یا ۲ برای المان‌های کاملاً تطبیق یافته، باشد. توجه به این نکته ضروری است که برای المان‌های لایه‌های کاملاً تطبیق یافته، نوع مصالح (ستون ششم) بایستی مطابق المان لایه خاک مجاور آن وارد گردد تا عملکرد صحیحی در جذب امواج داشته باشد.



شکل (۲-۱-۴): نمونه یک المان چهار گرهی

نکته: نقطه شروع ورود اطلاعات مهم نمی‌باشد و فقط ترتیب شماره گذاری بایستی رعایت گردد. به عنوان مثال برای شماره گره‌های معرفی شده در شکل (۲-۱-۴) مهم نیست که اطلاعات به صورت *abdc*, *bdca*, *acdb*, *bacd* و یا ... به صورت ساعتگرد و یا پادساعتگرد وارد گردد اما برای کلیه المان‌های تعریف شده بایستی این جهت رعایت گردد. ورود اطلاعات به صورت *abcd* یا *adbc* صحیح نبوده منجر به نتایج ناصحیح خواهد گردد.

مثال: در زیر یک محیط المان‌بندی شده و متن فایل تهیه شده نشان داده شده است.

1 PML المان ۱	2 2 المان ۲	3 2 المان ۳	4
5 PML المان ۴	6 1 المان ۵	7 1 المان ۶	8
9	10	11	12

شکل (۲-۱-۵) مثال برای یک محیط المان بندی شده دارای لایه‌های کاملاً تطبیق یافته

مثال تهیه فایل مشخصات المان‌ها برای محیط نشان داده شده در شکل (۲-۱-۵):

1	1	2	6	5	2	2
2	2	3	7	6	2	1
3	3	4	8	7	2	1
4	5	6	10	9	1	2
5	6	7	11	10	1	1
6	7	8	12	11	1	1

- فایل شرایط مرزی یک فایل text می‌باشد که بر اساس شرایط گیرداری مرزها تعیین می‌گردد و شامل سه ستون می‌باشد. ستون اول شماره گره، ستون دوم آزادی و یا گیردار بودن گره در راستای افقی و ستون سوم آزادی و یا گیردار بودن گره در راستای قائم را تعیین می‌نماید. در ستون دوم و سوم مقدار 0 نشانگر آزاد بودن گره در راستای مربوطه و مقدار 1 نشان دهنده گیرداری آن می‌باشد.

مثال:

12	1	0	گیردار بودن گره ۱۲ فقط در راستای افقی
14	0	1	گیردار بودن گره ۱۴ فقط در راستای قائم
20	1	1	گیردار بودن گره ۲۰ در راستای قائم و افقی

* به منظور تهیه فایل مشخصات گره‌ها، المان‌ها و شرایط مرزی می‌توانید از نرم‌افزارهای تولید مش همچون GID، HyperMesh و ... استفاده نمایید.

- فایل مشخصات مصالح یک فایل text می‌باشد که شامل اطلاعات مورد نیاز به منظور تعریف لایه‌های تشکیل دهنده مصالح می‌باشد. این فایل بایستی شامل ۸ ستون باشد که مطابق زیر می‌باشد:

شماره مصالح	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون	چگالی	فرکانس مود اول	فرکانس مود دوم	میرایی مود اول	میرایی مود دوم
Number	E	ν	ρ	f_1	f_2	d_1	d_2

مثال:

1	3000	0.3	1.8	6	32	0	0
2	11000	0.33	1.9	14	65	0.05	0.05

- فایل تحریک شامل یک فایل text می‌باشد که به صورت یک ستون شامل مقادیر تاریخچه زمانی تحریک بوده و در راستای افقی و قائم می‌تواند تعریف گردد. تحریک در راستای قائم و افقی می‌تواند متفاوت بوده و یا فقط یکی از این دو راستا بارگذاری گردد.

- نوع تحریک از کادر کشویی مقابل آن قابل تعیین می‌باشد که می‌تواند از نوع نیرو، شتاب، جابجایی و یا سرعت برای تحریک از سطح و شتاب، سرعت و جابجایی برای تحریک از کف باشد.

- در قسمت محدوده اعمال تحریک بایستی محدوده‌ای که تحریک معرفی شده باید به آن اعمال گردد، معرفی گردد. برای این منظور باید مینیموم و ماکسیموم مختصات نقاط مورد نظر وارد معرفی گردد. حتما توجه گردد که مختصات وارد شده در داخل محیط معرفی شده قرار گرفته و همچنین شامل حداقل یک گره باشد در غیر اینصورت تحلیل انجام نخواهد پذیرفت. همچنین اگر این نقاط داخل و یا بر روی مرز لایه‌های کاملاً تطبیق یافته (PML) واقع شده باشند، تمام نیرو توسط این لایه‌ها مستهلک شده و هیچ موجی وارد محیط مدلسازی شده نخواهد گردید و پاسخ‌ها صفر خواهند بود.

- عمق سنگ بستر لرزه‌ای برای انجام تحلیل تحریک از کف، عمقی است که در آن یک افزایش قابل توجه در سرعت موج برشی اتفاق می‌افتد و فرض بر این است که تمام امواج برخورد کننده به این مرز، تماماً به داخل محیط منعکس می‌گردد. توجه فرمایید که در نرم افزار IDAMP اینگونه فرض می‌گردد که لایه قرار گرفته از مرز مدل معرفی شده تا عمق وارد شده تماماً از جنس آخرین المان واقع در کف مدل بوده و تمام تحریک در عمق سنگ بستر لرزه‌ای معرفی شده دیکته شده و این مرز گیردار می‌باشد. لذا در صورت وجود لایه بندی مختلف، کاربر باستی تحریک مورد نیاز را به روش‌های مختلف در نرز بین لایه کاملاً تطبیق یافته (PML) و محیط مدل شده محاسبه کرده و در قسمت تحریک ورودی معرفی نماید. همچنین لازم به ذکر می‌باشد که اگر عمق سنگ بستر لرزه‌ای را وارد ننمایید و یا مقداری کمتر از محیط مدل معرفی شده وارد نمایید، تحلیل‌ها بر اساس قرار گیری سنگ بستر لرزه‌ای در عمق بینهایت و اعمال تحریک در مرز لایه های PML و محیط انجام می‌پذیرد.

- زمان تحلیل، مدت زمانی است که مایلید تحلیل انجام گرفته و پاسخ‌ها ثبت گردند. این زمان به طول تحریک بارگذاری شده بستگی نداشته و می‌تواند کمتر، بیشتر و یا برابر با فایل تحریک معرفی شده، در نظر گرفته شود.

- گام زمانی تحلیل نیز در برنامه حاضر بایستی برابر با همان گام تحریک معرفی شده لحاظ گردد.

* تذکر: واحد پارامترهای ورودی با در نظر گرفتن سازگاری آنها با یکدیگر توسط کاربر تعیین می گردد. بدیهی است واحد نتایج خروجی سازگار با واحدهای ورودی خواهد بود. در جدول (۲-۱-۲) برخی از واحدهای سازگار پیشنهاد گردیده است.

جدول (۲-۱-۲): برخی از واحدهای سازگار پیشنهادی

کمیت	Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	Us Unit (inch)
طول	Length	m	mm	ft	in
نیرو	Force	N	N	lbf	lbf
جرم	Mass	kg	ton (10 ³ kg)	slug	lbf.s ² /in
زمان	Time	Sec	Sec	Sec	Sec
تنش	Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
انرژی	Energy	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft.lbf	in.lbf
چگالی	Density	kg/m ³	ton/mm ³	slug/ft ³	lbf.s ² /in ⁴

پس از معرفی پارامترهای مورد نیاز و ثبت درخواست، برنامه اجرا شده و در صورت اتمام، پست الکترونیکی حاوی کد رهگیری جهت دریافت نتایج، ارسال خواهد گردید. همچنین در صورت بروز هرگونه خطایی در اجرای برنامه، این امر توسط پست الکترونیک اطلاع رسانی خواهد گردید تا با بررسی فایل های ورودی در صورت نیاز دوباره مراحل معرفی شده طی گردند.

بر اساس مدل های مختلف تست شده در این نرم افزار، عمده ترین منابع ایجاد خطا و عدم اتمام تحلیل ها ممکن است ناشی از عوامل زیر باشند:

- عدم ارسال صحیح فایل های ورودی برنامه (این فایل ها بایستی با فرمت معرفی شده و به صورت فایلی با پسوند txt بارگذاری شوند و از بارگذاری با سایر پسوندها خودداری گردد).

به منظور سهولت در ایجاد این فایل‌ها، می‌توانید آن‌ها را در نرم‌افزار Excel تهیه نموده و به صورت Text (tab delimited) ذخیره نموده و بارگذاری نمایید.

- عدم رعایت اصول نام‌گذاری و یا استفاده از کاراکتر اشتباه در فایل‌های بارگذاری شده. به عنوان مثال استفاده از حروف در شماره گذاری المان‌ها و یا گره‌ها و یا استفاده از "/" به جای "." در معرفی مقادیر اعشاری و مواردی از این قبیل.

- عدم رعایت فرمت ارائه شده در تهیه فایل‌های ورودی. به عنوان مثال عدم رعایت تعداد ستون مورد نیاز در هر یک از فایل‌ها.

- عدم وجود گره در مختصات معرفی شده به منظور اعمال تحریک از سطح.

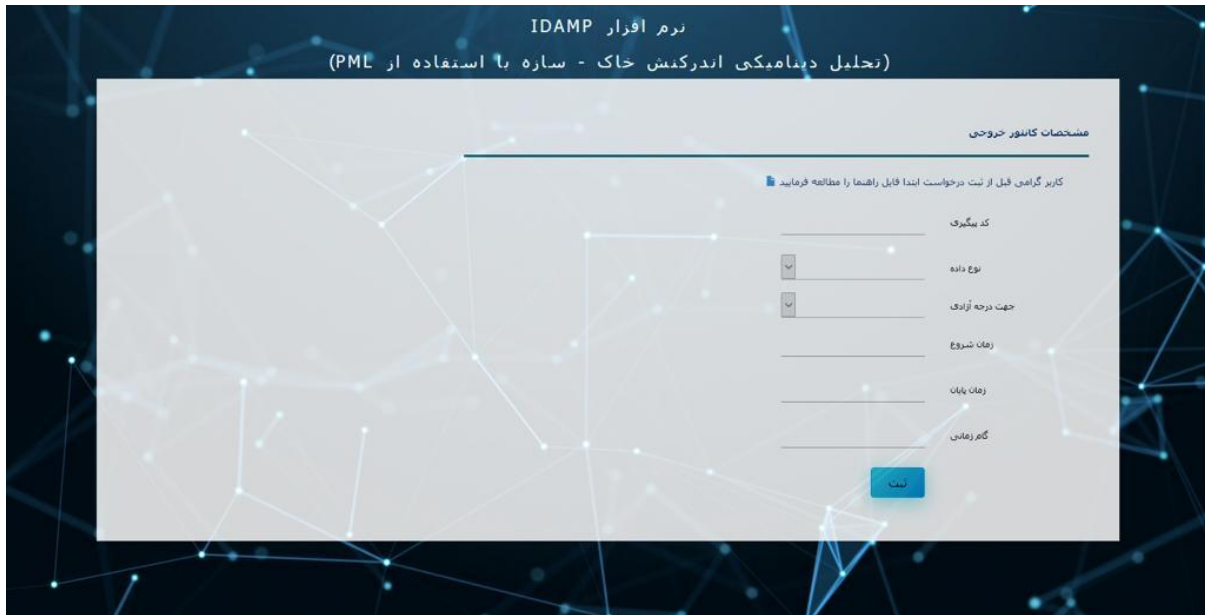
- با توجه به محدودیت سخت‌افزاری موجود، درجات آزادی قابل تحلیل در نسخه حاضر محدود بوده و ممکن است با توجه به مدل بارگذاری شده، برنامه نتواند ماتریس‌های مورد نیاز را تهیه و تحلیل نماید. لذا در صورت نیاز می‌توانید مدلی با تعداد درجات آزادی کمتر را مجدداً تهیه و بارگذاری نمایید. تلاش خواهد گردید تا با ارتقای نرم‌افزار حاضر و سخت‌افزار موجود در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که تحلیل‌ها در آن انجام می‌پذیرد، این محدودیت تا حد امکان برطرف گردد.

* پس از بررسی و اطمینان از صحت داده‌های ورودی و عدم انجام تحلیل، می‌توانید با پشتیبانی نرم‌افزار ارتباط حاصل نمایید.

پس از اتمام انجام تحلیل، پست الکترونیکی حاوی کد پیگیری ارسال خواهد گردید که توسط آن می‌توانید نتایج حاصل از تحلیل‌ها را دریافت نمایید.

۲-۲- نمایش کانتور

برای رسم کانتور نتایج حاصل از تحلیل، پس از دریافت کد پیگیری و ورود به صفحه رسم کانتور نتایج، لازم است تا پارامترهای مورد نیاز جهت ترسیم کانتور را وارد نمایید. این صفحه مشابه شکل (۲-۱) می‌باشد و بایستی مقادیر تعیین شده را مطابق نیاز وارد نمایید.



شکل (۲-۲-۱): صفحه ورود اطلاعات جهت رسم کانتور

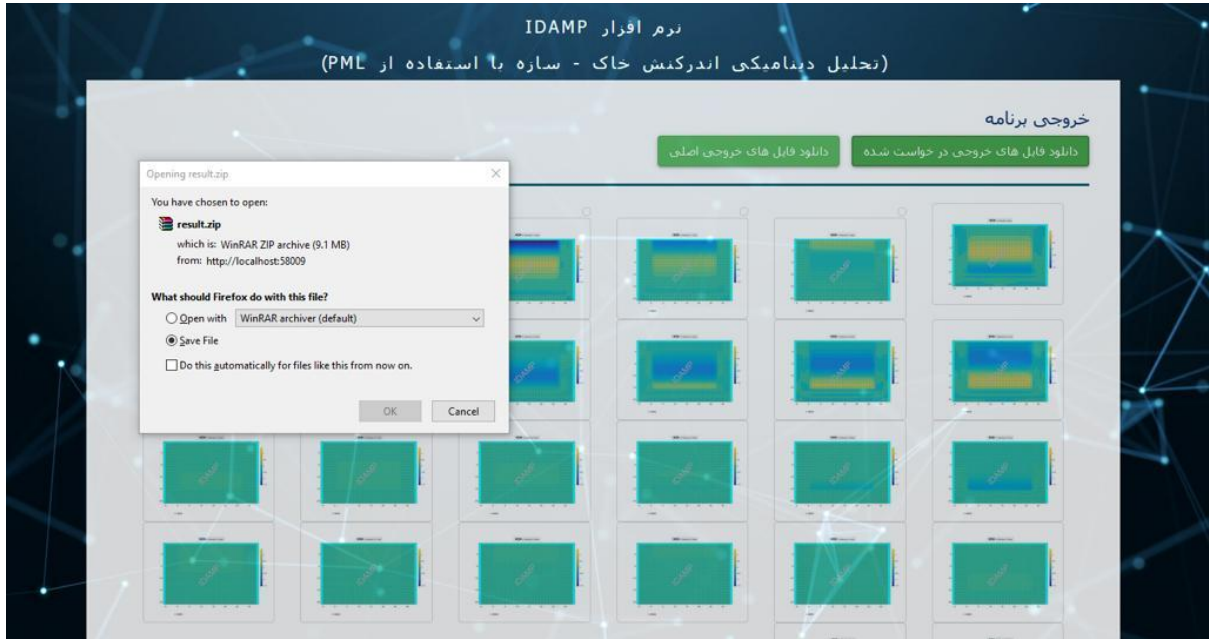
- کد پیگیری: همان کدی است پس از اتمام پردازش توسط پست الکترونیک ارسال گردیده است.
- نوع داده: پارامتری از نتایج تحلیل است که نیاز به ترسیم کانتور آن دارید. این داده می‌تواند از بین شتاب، سرعت و یا جابجایی در گره‌ها انتخاب گردد.
- جهت درجه آزادی: در این گزینه راستای پارامتر مورد نظر انتخاب می‌گردد که می‌تواند در راستای افقی، در راستای قائم و یا جابجایی کل باشد. توجه داشته باشید که کانتور جابجایی کل قدر مطلق بزرگای پارامتر درخواستی را در گره نشان می‌دهد و راستای آن نمایش داده نمی‌شود.
- زمان شروع: زمان شروع ترسیم کانتور را می‌توانید در این قسمت تعیین نمایید.
- زمان پایان: زمان خاتمه ترسیم کانتور را می‌توانید در این قسمت تعیین نمایید.
- گام زمانی: گام‌های زمانی ترسیم کانتور را در این قسمت می‌توانید تعیین نمایید. با کوچکتر انتخاب کردن گام زمانی، انیمیشن نمایش کانتور سرعت کمتری خواهد داشت اما زمان تهیه کانتور، افزایش پیدا خواهد نمود.

با وارد نمودن مقادیر بالا و ثبت درخواست، برنامه در گام‌های زمانی تعیین شده، کانتور مورد درخواست را تهیه و انیمیشن تغییرات آن را در طول بازه زمانی تعیین شده نمایش می‌دهد. صفحه نهایی نمایش نتایج به صورت شکل (۲-۲-۲) خواهد بود.



شکل (۲-۲-۲): صفحه نمایش نتایج نهایی کانتور ترسیم شده

با اتمام ترسیم کانتورهای درخواستی، صفحه مطابق شکل (۲-۲-۲) نمایش داده خواهد شد که در این صفحه کانتورهای تهیه شده در گام‌های زمانی تعیین شده و انیمیشن تغییرات کانتور پارامتر مورد نظر در طول زمان نمایش داده می‌شود. همچنین با انتخاب هر یک از عکس‌ها می‌توانید تصویر بزرگنمایی شده از کانتور تهیه شده در زمان مشخص را مشاهده و ذخیره نمایید. همچنین با انتخاب گزینه دریافت کلیه فایل‌های خروجی در بالای صفحه، می‌توانید تمامی تصاویر تهیه شده و انیمیشن موجود در این صفحه را به صورت فایل زیپ شده به طور یکجا دریافت نمایید (شکل (۲-۲-۳)).



شکل (۲-۳): دریافت کل کانتورهای تهنه شده به همراه انیمیشن در قالب یک فایل زیپ

* توجه نمایید که کد پیگیری یکبار مصرف نبوده و می‌توانید با استفاده از این کد پیگیری به تعداد دلخواه و با پارامترهای مختلف، کانتورهای مورد نظران را تهیه فرمایید.

۲-۳- نمایش نمودار

جهت دریافت نمودار، پس از دریافت کد رهگیری لازم است تا مشخصات مورد نظران را در قالب یک فایل text (مشابه با فایل نمونه قابل دانلود در سایت) در صفحه مورد نظر بارگذاری نمایید. این فایل شامل ۴ ستون می‌باشد که ستون اول معرف پارامتر مورد نظر می‌باشد که می‌تواند جابجایی، سرعت و یا شتاب باشد. ستون دوم شماره گره مورد نظر می‌باشد، ستون سوم نشانگر راستای افقی و ستون چهارم راستای قائم می‌باشد. لذا به طور کلی هر سطر از فایل تهیه شده می‌تواند مقادیری مطابق جدول (۲-۳-۱) داشته باشد.

جدول (۲-۳-۱): مقادیر مجاز در تهیه فایل خروجی مورد نیاز

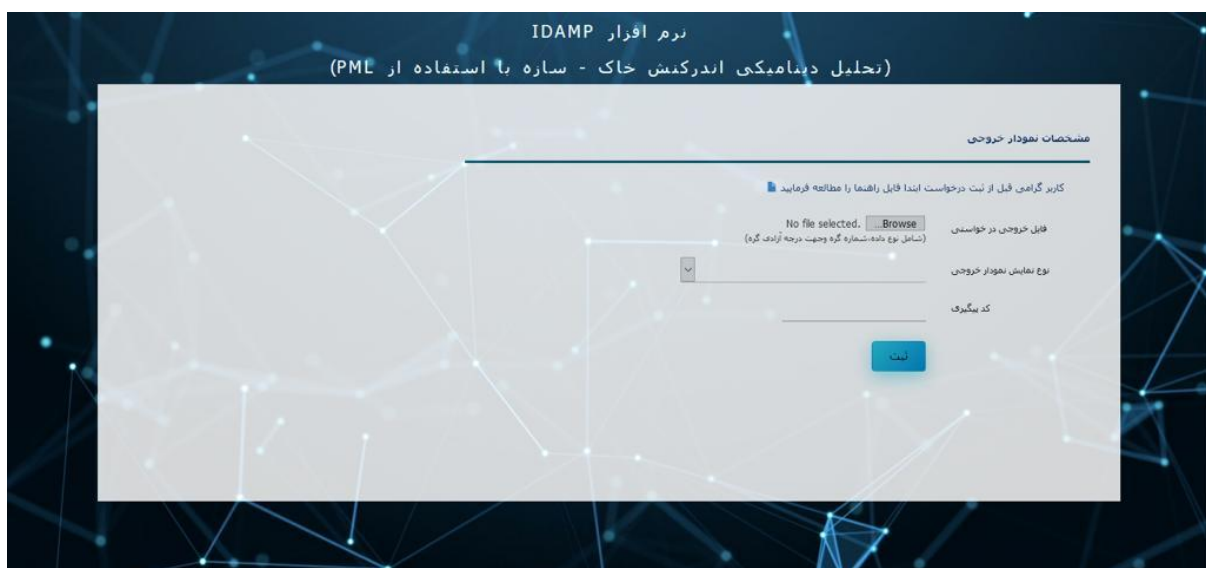
<i>dis</i>	<i>Node_number</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>vel</i>		<i>1</i>	<i>1</i>
<i>acc</i>			

به عنوان مثال:

dis	211	1	0	جابجایی گره شماره ۲۱۱ در راستای افقی
vel	211	0	1	سرعت گره شماره ۲۱۱ در راستای قائم
acc	211	1	1	شتاب گره شماره ۲۱۱ در راستای افقی و قائم

در تهیه فایل خروجی مورد نیاز، بایستی موارد زیر را در نظر بگیرید:

- در ستون سوم و چهارم مقدار 0 به ترتیب نشانگر عدم نیاز به ترسیم نمودار در راستای افقی و قائم می‌باشد و با وارد نمودن مقدار 1 در این جهات، نمودار مورد درخواست ترسیم خواهد گشت.
- تمامی سطرها بایستی شامل ۴ ستون مطابق با مقادیر مشخص شده باشند.



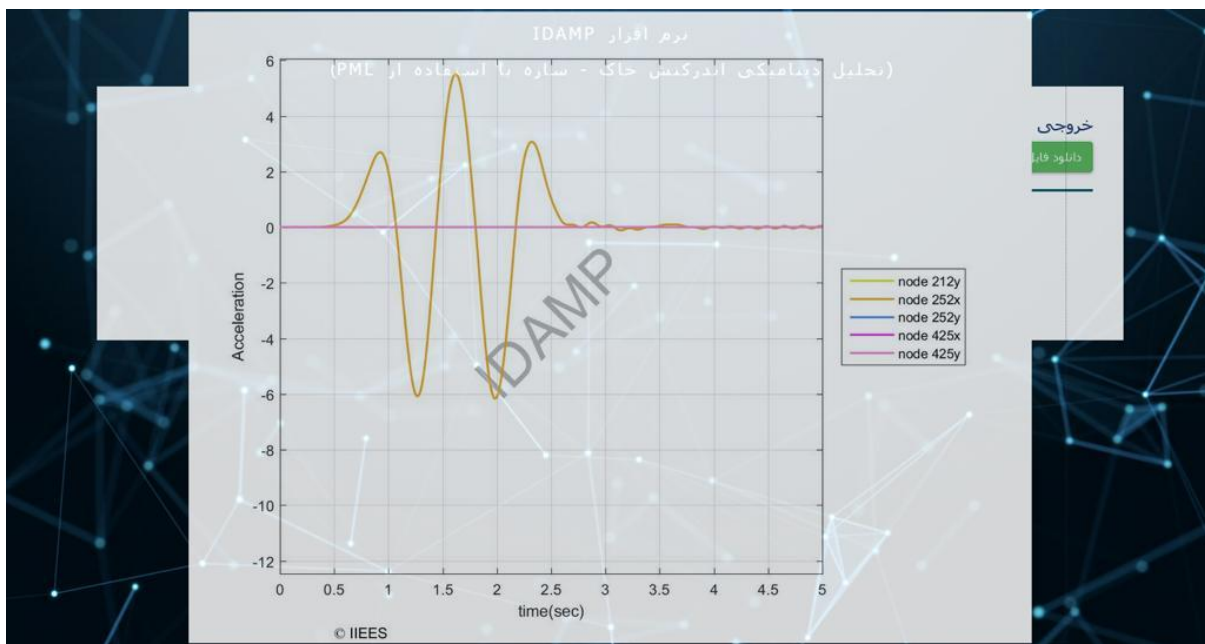
شکل (۲-۳-۱): صفحه ورود اطلاعات ترسیم نمودار

نمودارها در این نرم افزار به دو صورت قابل ارائه می‌باشد، یک اینکه برای تک تک درجات آزادی به صورت فایل‌های مجزا تاریخچه زمانی پارامترهای مختلف ارائه گردد (شکل (۲-۳-۲)) و دیگری اینکه تمام این درجات آزادی در یک نمودار ترسیم گردند (شکل (۲-۳-۳)). با انتخاب هر یک از اشکال نیز امکان بزرگنمایی و ذخیره نمودار امکان پذیر می‌باشد. همچنین می‌توانید تمامی نمودارهای تهیه شده را به صورت یکجا در قالب یک فایل زیپ شده دریافت نمایید.

* توجه نمایید که کد پیگیری یکبار مصرف نبوده و می‌توانید با استفاده از این کد پیگیری به تعداد دلخواه و با پارامترهای مختلف، نمودارهای مورد نظرتان را تهیه فرمایید.



شکل (۲-۳-۲): صفحه نمایش نتایج خروجی به صورت مجزا برای تک تک درجات آزادی تعیین شده



شکل (۳-۳-۲): صفحه نمایش نتایج خروجی به صورت یکجا برای درجات آزادی تعیین شده

۲-۴- نمایش تغییر شکل

برای رسم نتایج حاصل از تحلیل، پس از دریافت کد پیگیری و ورود به صفحه رسم تغییر شکل، لازم است تا پارامترهای مورد نیاز جهت ترسیم کانتور را وارد نمایید. این صفحه مشابه شکل (۲-۴-۱) می باشد و بایستی مقادیر تعیین شده را مطابق نیاز وارد نمایید.



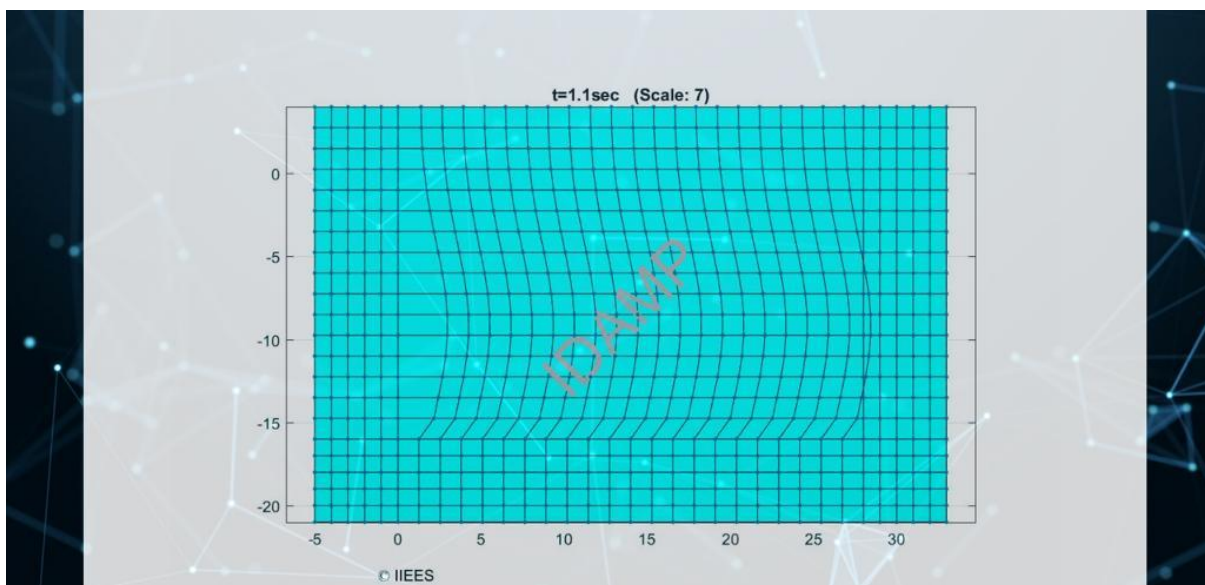
شکل (۲-۴-۱): صفحه ورود اطلاعات جهت رسم تغییر شکل

- کد پیگیری: همان کدی است پس از اتمام پردازش توسط پست الکترونیک ارسال گردیده است.
- بزرگنمایی تغییر شکل: در این قسمت می توانید بر حسب نیاز مقدار بزرگنمایی دلخواه خود را به منظور نمایش تغییر شکل ها وارد نمایید.
- زمان شروع: زمان شروع ترسیم کانتور را می توانید در این قسمت تعیین نمایید.
- زمان پایان: زمان خاتمه ترسیم کانتور را می توانید در این قسمت تعیین نمایید.
- گام زمانی: گام های زمانی ترسیم کانتور را در این قسمت می توانید تعیین نمایید. با کوچکتر انتخاب کردن گام زمانی، انیمیشن نمایش تغییر شکل سرعت کمتری خواهد داشت اما زمان تهیه آن افزایش پیدا خواهد نمود.

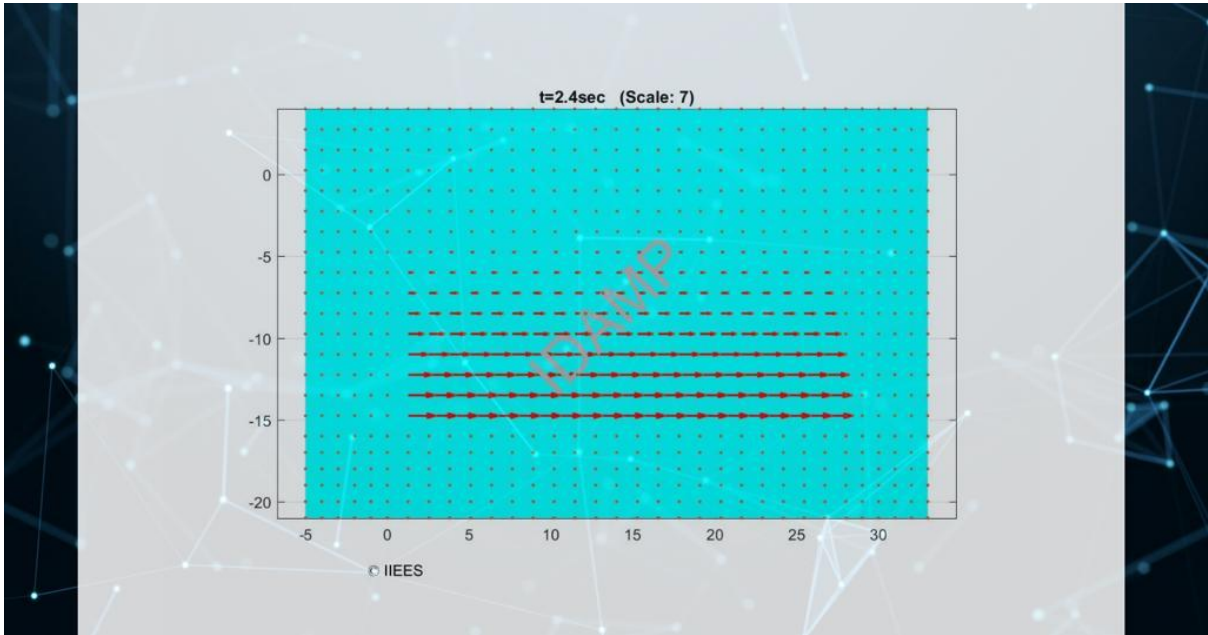
- تغییر شکل‌ها به دو صورت نمایش المان‌های تغییر شکل یافته و یا نمایش بردار تغییر شکل، قابل نمایش می‌باشند که در قسمت نحوه نمایش قابل انتخاب می‌باشد.



شکل (۲-۴-۲): صفحه نمایش نتایج تغییر شکل



شکل (۳-۴-۲): نمونه تصویر نمایش تغییر شکل یافته المان‌ها با مقیاس ۷ برابر



شکل (۲-۴-۴): نمونه تصویر نمایش بردارهای تغییر شکل با مقیاس ۷ برابر

* لازم به ذکر می‌باشد به دلیل اینکه هدف اصلی این پروژه تحلیل خطی در حوزه زمان با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش می‌باشد، ممکن است اشکال و کانتورهای ترسیم شده از دقت کافی برخوردار نباشند و در صورت نیاز می‌توانید با استفاده از داده‌های متنی بوسیله سایر نرم‌افزارها ترسیم نمایید.

نتایج تحلیل در قالب فایل متنی، هم در صفحه ارائه نتایج به صورت کانتور و هم در صفحه ارائه نتایج به صورت نمودار برای تغییر مکان، سرعت و جابجایی در کل درجات آزادی مدل توسط لینک بالای صفحات به صورت فایل زیپ شده قابل دریافت می‌باشد.

در فایل‌های نتایج ارائه شده، هر ستون معرف گام‌های زمانی تحلیل بوده و سطرها درجات آزادی مختلف را نشان می‌دهند. به عنوان مثال سطر $2n-1$ درجه آزادی گره n ام در جهت افقی و سطر $2n$ درجه آزادی گره n ام در جهت قائم را در هر یک از فایل‌های جابجایی، سرعت و شتاب در هر گام از تحلیل را نشان می‌دهد.

مراجع

- [١] P. Moczo, J. O. Robertsson, and L. Eisner, "The finite-difference time-domain method for modeling of seismic wave propagation," *Advances in geophysics*, vol. 48, pp. 421-516, 2007.
- [٢] J. Wolf, "Dynamic soil-structure interaction. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs," 1985.
- [٣] J. Wolf and W. Hall, *Soil-structure-interaction analysis in time domain: A Division of Simon & Schuster*, 1988.
- [٤] M. J. Dowling and J. F. Hall, "Nonlinear seismic analysis of arch dams," *Journal of engineering Mechanics*, vol. ١١٥, pp. 768-789, 1989.
- [٥] J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *Journal of computational physics*, vol. 114, pp. 185-200, 1994.
- [٦] Z. Xu, H. Han, and X. Wu, "Adaptive absorbing boundary conditions for Schrödinger-type equations: Application to nonlinear and multi-dimensional problems," *Journal of Computational Physics*, vol. 225, pp. 1577-1589, 2007.
- [٧] G. J. Fix and S. P. Marin, "Variational methods for underwater acoustic problems," *Journal of Computational Physics*, vol. 28, pp. 253-270, 1978.
- [٨] C. I. Goldstein, "A finite element method for solving Helmholtz type equations in waveguides and other unbounded domains," *Mathematics of Computation*, vol. 39, pp. 309-324, 1982.
- [٩] C. Canuto, S. Hariharan, and L. Lustman, "Spectral methods for exterior elliptic problems," *Numerische Mathematik*, vol. 46, pp. 505-520, 1985.
- [١٠] J. B. Keller and D. Givoli, "Exact non-reflecting boundary conditions," *Journal of computational physics*, vol. 82, pp. 172-192, 19٨٩.
- [١١] L. Pearson, R. Whitaker, and L. Bahrmassel, "An exact radiation boundary condition for the finite-element solution of electromagnetic scattering on an open domain," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, pp. 3046-3048, 1989.
- [١٢] D. Givoli and I. Patlashenko, "Optimal local non-reflecting boundary conditions," *Applied Numerical Mathematics*, vol. 27, pp. 367-384, 1998.
- [١٣] M. J. Grote, C. Kirsch, and P. Meury, "Nonreflecting Boundary Conditions for Multiple Domain Wave Scattering in Unbounded Media," in *Numerical Mathematics and Advanced Applications*, ed: Springer, 2004, pp. 391-399.
- [١٤] G. Dasgupta, "A finite element formulation for unbounded homogeneous continua," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 49, pp. 136-140, 1982.
- [١٥] C. Song and J. P. Wolf, "The scaled boundary finite-element method—alias consistent infinitesimal finite-element cell method—for elastodynamics," *Computer Methods in applied mechanics and engineering*, vol. 147, pp. 329-355, 1997.
- [١٦] C. Song and J. P. Wolf, "The scaled boundary finite-element method: analytical solution in frequency domain," *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 164, pp. 249-264, 1998.
- [١٧] C. Song and J. P. Wolf, "The scaled boundary finite-element method—a primer: solution procedures," *Computers & Structures*, vol. 78, pp. 211-225, 2000.
- [١٨] J. P. Wolf and C. Song, "The scaled boundary finite-element method—a primer: derivations," *Computers & Structures*, vol. 78, pp. 191-210, 2000.
- [١٩] J. P. Wolf and C. Song, *Finite-element modelling of unbounded media: Wiley Chichester*, 1996.
- [٢٠] G. Waas, "Linear two-dimensional analysis of soil dynamics problems in semi-infinite layer media," *Ph. D. Thesis, University of California*, 1972.
- [٢١] E. Kausel and J. M. Roesset, "Dynamic stiffness of circular foundations," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 101, pp. 771-785, 1975.

- [٢٢] V. Lotfi, J. M. Roesset, and J. L. Tassoulas, "A technique for the analysis of the response of dams to earthquakes," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 15, pp. 463-489, 1987.
- [٢٣] J. K. Kim, H. M. Koh, K. J. Kwon, and J. S. Yi, "A three-dimensional transmitting boundary formulated in Cartesian co-ordinate system for the dynamics of non-axisymmetric foundations," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 29, pp. 1527-1546, 2000.
- [٢٤] S. Bougacha and J. Tassoulas, "Dam-water-sediment-rock systems: Seismic analysis," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 26, pp. 680-693, 2006.
- [٢٥] M. R. Maleki Javan, A. Noorzad, and M. L. Namin, "Three-dimensional absorbing boundary for analysis of fluid-saturated porous media," *Computers and Geotechnics*, vol. 35, pp. 115-123, 2008.
- [٢٦] M. R. Maleki Javan, A. Noorzad, and M. Latifi Namin, "Three-dimensional nonlinear finite element analysis of pile groups in saturated porous media using a new transmitting boundary," *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 32, pp. 681-699, 2008.
- [٢٧] J. Lysmer and R. L. Kuhlemeyer, "Finite dynamic model for infinite media," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 95, pp. 859-878, 1969.
- [٢٨] B. Engquist and A. Majda, "Absorbing boundary conditions for numerical simulation of waves," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 74, pp. 1765-1776, 1977.
- [٢٩] B. Engquist and A. Majda, "Radiation boundary conditions for acoustic and elastic wave calculations," *Communications on pure and applied mathematics*, vol. 32, pp. 313-357, 1979.
- [٣٠] A. Bayliss and E. Turkel, "Boundary conditions for exterior acoustic problems," in *Advances in Computer Methods for Partial Differential Equations-III*, 1979, pp. 127-131.
- [٣١] A. Bayliss and E. Turkel, "Radiation Conditions for Wavelike Equations," *ICASE Report*, pp. 79-26, 1979.
- [٣٢] R. L. Higdon, "Absorbing boundary conditions for difference approximations to the multidimensional wave equation," *Mathematics of computation*, vol. 47, pp. 437-459, 1986.
- [٣٣] R. L. Higdon, "Numerical absorbing boundary conditions for the wave equation," *Mathematics of computation*, vol. 49, pp. 65-90, 1987.
- [٣٤] D. Givoli, "High-order local non-reflecting boundary conditions: a review," *Wave motion*, vol. 39, pp. 319-326, 2004.
- [٣٥] F. Collino, "High order absorbing boundary conditions for wave propagation models. Straight line boundary and corner cases," in *Second International Conference on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation (Newark, DE, 1993)*, 1993, pp. 161-171.
- [٣٦] S. Hariharan and T. Hagstrom, "A systematic approach for constructing asymptotic boundary conditions for wave-like equations," in *IUTAM Symposium on Computational Methods for Unbounded Domains*, 1998, pp. 197-206.
- [٣٧] M. N. Guddati and J. L. Tassoulas, "Continued-fraction absorbing boundary conditions for the wave equation," *Journal of Computational Acoustics*, vol. 8, pp. 139-156, 2000.
- [٣٨] J. B. Keller and M. J. Grote, "Exact nonreflecting boundary condition for elastic waves," *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 60, pp. 803-819, 2000.
- [٣٩] D. Givoli and B. Neta, "High-order non-reflecting boundary scheme for time-dependent waves," *Journal of Computational Physics*, vol. 186, pp. 24-46, 2003.
- [٤٠] D. Givoli and B. Neta, "High-order non-reflecting boundary conditions for dispersive waves," *Wave Motion*, vol. 37, pp. 257-271, 2003.
- [٤١] D. Givoli and B. Neta, "High-order nonreflecting boundary conditions for the dispersive shallow water equations," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 158, pp. 49-60, 2003.

- [٤٢] D. Givoli, B. Neta, and I. Patlashenko, "Finite element analysis of time-dependent semi-infinite wave-guides with high-order boundary treatment," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 58, pp. 1955-1983, 2003.
- [٤٣] V. van Joolen*, D. Givoli, and B. Neta, "High-order non-reflecting boundary conditions for dispersive waves in Cartesian, cylindrical and spherical coordinate systems," *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, vol. 17, pp. 263-274, 2003.
- [٤٤] T. Hagstrom and T. Warburton, "A new auxiliary variable formulation of high-order local radiation boundary conditions: corner compatibility conditions and extensions to first-order systems," *Wave motion*, vol. 39, pp. 327-338, 2004.
- [٤٥] A. Samii and V. Lotfi, "High-order adjustable boundary condition for absorbing evanescent modes of waveguides and its application in coupled fluid-structure analysis," *Wave motion*, vol. 49, pp. 238-257, 2012.
- [٤٦] A. Samii and V. Lotfi, "Application of H-W boundary condition in dam-reservoir interaction problem," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 50, pp. 86-97, 2012.
- [٤٧] B. Weber, "Rational transmitting boundaries for time-domain analysis of dam-reservoir interaction," PhD Thesis, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 1994.
- [٤٨] G. Feltrin, "Absorbing boundaries for the time-domain analysis of dam-reservoir-foundation systems," PhD Thesis, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 1997.
- [٤٩] C. Song and J. P. Wolf, "Dynamic stiffness of unbounded medium based on damping-solvent extraction," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 23, pp. 169-181, 1994.
- [٥٠] U. Basu and A. K. Chopra, "Erratum to 'Perfectly matched layers for transient elastodynamics of unbounded domains'(Int. J. Numer. Meth. Engng 2004; 59: 1039-1074)," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 61, pp. 156-157, 2004.
- [٥١] H. Zhong, G. Lin, J. Li, and J. Chen, "An efficient time-domain damping solvent extraction algorithm and its application to arch dam-foundation interaction analysis," *Communications in numerical methods in engineering*, vol. 24, pp. 727-748, 2008.
- [٥٢] U. Basu and A. K. Chopra, "Perfectly matched layers for time-harmonic elastodynamics of unbounded domains: theory and finite-element implementation," *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 192, pp. 1337-1375, 2003.
- [٥٣] M. Davoodi and A. Pourdeilami, "Application of perfectly matched layer (PML) in earthfill dam-foundation interaction analysis (in persian)," PhD Degree ,International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, 2017.
- [٥٤] B. Das and G. Ramana, "Principles of Soil Dynamics, Cengage Learning," ed: Stanford, USA, 2011.
- [٥٥] H. Abouseeda and P. Dakoulas, "Response of earth dams to P and SV waves using coupled FE-BE formulation," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 25, pp. 1177-1194, 1996.
- [٥٦] G. Schmid, S. Wang, and N. Chouw, "SSI-FEBEM: A computer program for dynamic soil-structure interaction analysis using finite element and boundary element methods," Bochum Univ.(Germany). Sonderforschungsbereich 151-Tragverhalten und ...1991.