

EXTENDED ABSTRACT

The Influence of Volumetric Inclined Waves Propagation on The Kinematic Response of Rigid Strip Footings Resting on A Semi-Infinite Soil Mass Using Boundary Element Method

Forough Ashkan^a, Abbas Eslami Haghighat^{b,*}

^a Faculty of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

Received: 03 February 2024; **Reviewed:** 06 April 2024; **Accepted:** 06 May 2024

Keywords:

Boundary element method, Kinematic soil structure interaction, Rigid strip foundation, Impedance functions, Foundation input motion, Volumetric waves.

1. Introduction

Seismic analysis of foundations is one of the key problems in geotechnical earthquake engineering. For this purpose, two general methods are proposed. In the direct method, the entire structure, foundations and subgrade are modeled in one step. But, in substructure method, the contribution of stiffness and mass of foundations in the analysis are considered separately. In this paper, the seismic response of strip surface footings under volumetric oblique incident waves SV, P and SH is investigated using boundary element method. For this purpose, at first, the impedance functions of the strip footing located on the semi-infinite soil mass are calculated using boundary element method with three-node quadratic elements. The calculated impedance functions depend on the frequency, the width of the strip footing, the shear wave velocity and the Poisson's ratio of the soil mass. The input motion of strip footing which is subjected to volumetric inclined SV, P and SH waves are then obtained by using free field motion and the boundary element method. It can be seen that the displacement response of the foundation at the dimensionless frequency of 3, compared to the horizontal component of the free field motion of SH and SV waves as well as vertical component of P wave at angle of $\theta=30^\circ$ are reduced 41%, 38% and %, respectively. By the way, as an example in time domain, the response of surface strip footing due to inclined SV wave with Ricker waveform is analyzed utilizing FFT algorithm.

2. Methodology

2.1. Boundary element method

The boundary element method is one of the powerful methods for analyzing elastic and homogeneous media in static and dynamic states. In this method, calculations are performed only on the boundary of the domain. The integral equations used in the boundary element method are obtained from the weak form of the governing differential equation.

3. Results and discussion

3.1. Response strip surface foundation under harmonic P, SV and SH waves with different propagation angles

The response of horizontal, vertical and rocking motions of the rigid and massless strip footing due to harmonic P, SV and SH waves with propagation angles of 0°, 15°, 30°, 60°, and 90° are obtained versus the dimensionless frequency a_0 which is defined as:

$$a_0 = \frac{\omega B}{C_s} = \frac{\pi(2B)}{\lambda_s} = \frac{2\pi(2B)}{\lambda_p} \tag{1}$$

Where B , λ_s and λ_p are half width of strip footing, shear and pressure wavelengths. The results show that for oblique incident of p-wave, the normalized vertical displacement decreased with increasing propagation angle, but, the normalized values of horizontal displacement and rocking motion are increased (Fig. 1). For oblique incident SV-wave with propagation angle below critical value, the normalized horizontal displacement is decreased and the normalized vertical displacement and rocking motion are generated (Fig. 2).

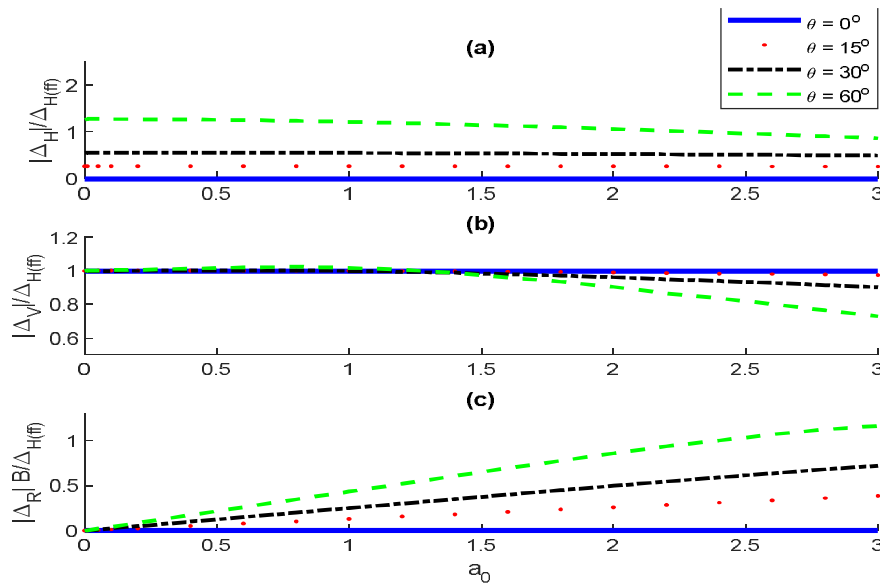


Fig. 1. Displacement of surface footing to inclined P waves for $\nu = 1/3$: a) Horizontal, b) Vertical, c) Rotation

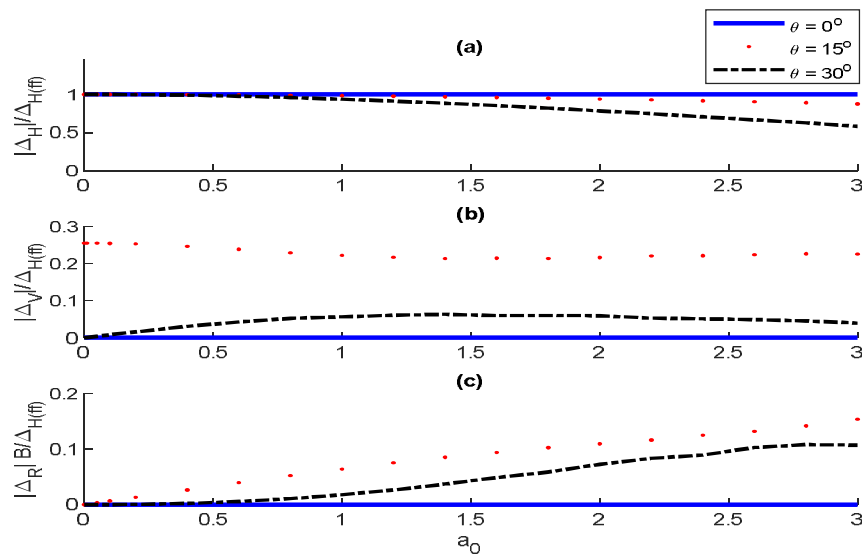


Fig. 2. Displacement of surface footing to inclined SV waves for $\nu = 1/3$: a) Horizontal, b) Vertical, c) Rotation

For the SH-wave, the amount of normalized horizontal displacement is decreased with the increasing of incident angle (Fig. 3).

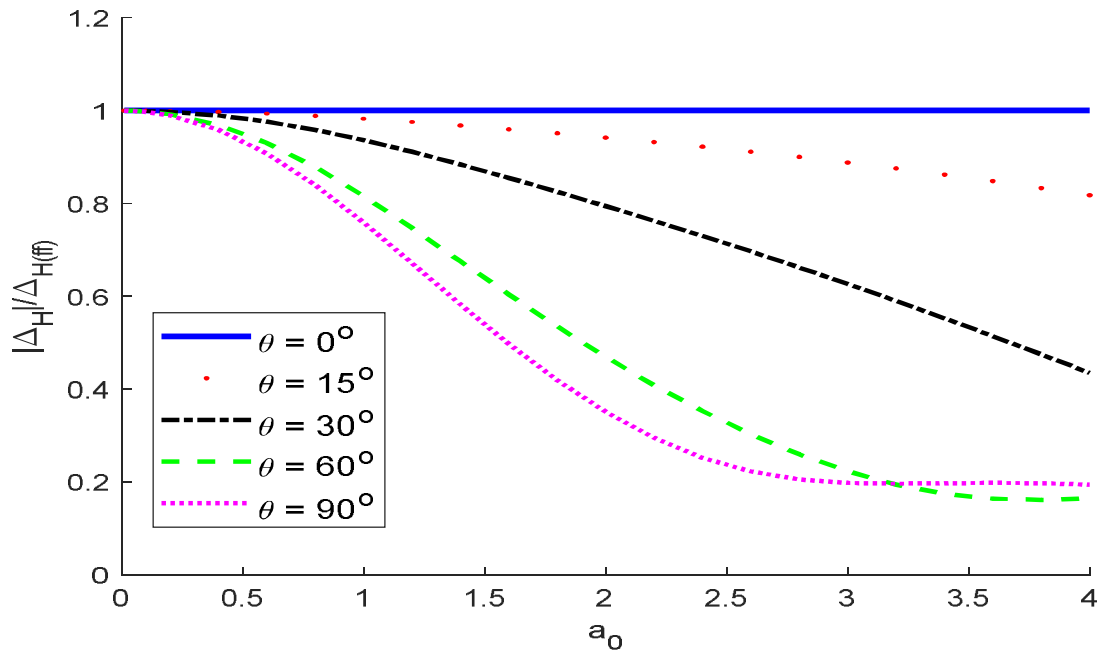


Fig. 3. Horizontal displacement of surface footing to inclined SH waves

3.2. Time response of a surface footing under dynamic incident SV wave

Dynamic response of surface footing with $B = 7\text{m}$, $C_s = 300\frac{\text{m}}{\text{s}}$ and $\nu = \frac{1}{3}$ due to SV wave with Ricker waveform and incident angle of 30° can be evaluated using boundary element method. From the results in the frequency domain, the time domain response can be easily obtained by Fourier transform and FFT technique. For this problem, the no vertical free field motion is generated. As expected, the reduction of horizontal displacement and the appearance of vertical and rotational components are observed (Fig. 4).

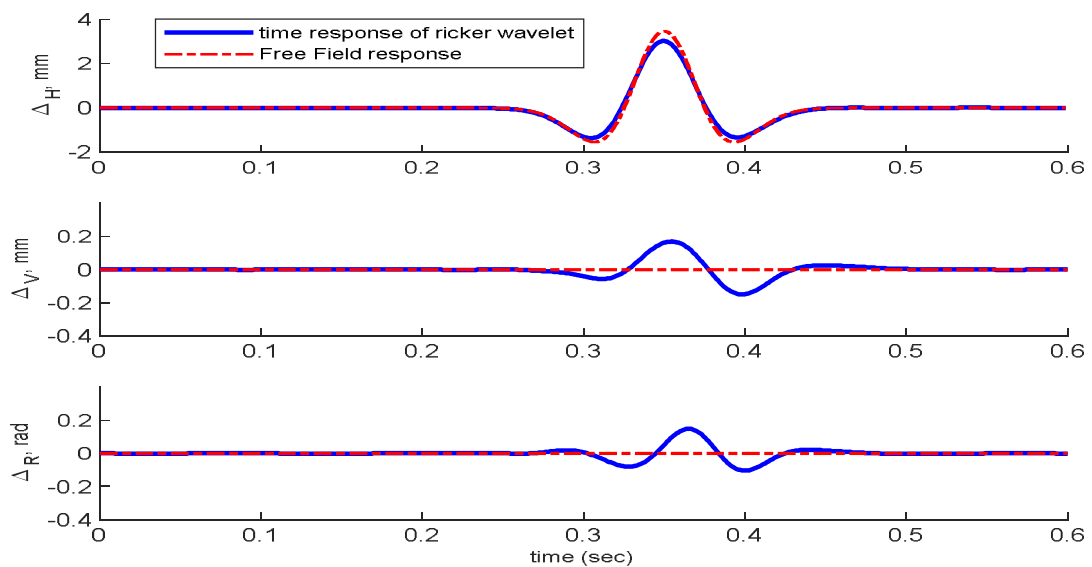


Fig. 4. Dynamic response and free field motion of surface footing

تأثیر انتشار امواج حجمی مایل بر پاسخ سینماتیکی شالوده‌های نواری صلب بر روی توده نیمه بینهایت خاک به کمک روش المان مرزی

اشکان فروغ¹، عباس اسلامی حقیقت^{2*}

¹ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

² استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

دریافت: 1402/11/14، بازنگری: 1403/1/18، پذیرش: 1403/2/17، نشر آنلاین: 1403/2/17

چکیده

تحلیل لرزه‌های شالوده‌ها از جمله مسائل مطرح در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای بوده و بدین منظور دو روش کلی پیشنهاد می‌شود. در روش مستقیم، کل سازه و شالوده به همراه خاک بستر مدل‌سازی شده اما در روش زیرسازه، پاسخ‌های شالوده و سازه به صورت گام‌به‌گام محاسبه گردیده و تأثیر سختی و جرم اجزای مختلف سازه و همچنین شالوده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله، پاسخ لرزه‌های شالوده‌های سطحی نواری تحت امواج ورودی هارمونیک مایل حجمی SV، P، SH به کمک روش المان مرزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور در ابتدا، توابع امپدانس (Impedance Functions) شالوده‌های نواری واقع بر توده بی‌نهایت خاک با روش المان مرزی و استفاده از المان‌های سه‌گره‌ای کوادراتیک (Quadratic) محاسبه می‌شوند. توابع امپدانس محاسبه شده به فرکانس، عرض شالوده نواری، سرعت موج برشی و نیز ضریب پواسون توده خاک بستگی دارند. در ادامه، شالوده نواری تحت امواج حجمی SV، P، SH و تحت زوایای مختلف قرار گرفته و با در نظر گرفتن پاسخ میدان آزاد و استفاده مجدد از روش المان مرزی، حرکت ورودی به شالوده به دست می‌آید. مشاهده می‌شود که پاسخ شالوده در فرکانس بی‌بعد 3، نسبت به پاسخ میدان آزاد و برای مؤلفه افقی موج SV، SH و نیز برای مؤلفه قائم موج P در زاویه $\theta = 30^\circ$ به ترتیب 41%، 38% و 20% کاهش پیدا می‌کند. همچنین به‌عنوان مثالی در حوزه زمان، پاسخ شالوده نواری سطحی به یک موج مایل SV با تغییرات در قالب موج ریکر (Ricker wave) به کمک الگوریتم FFT تحلیل گردید.

کلیدواژه‌ها: روش المان مرزی، اندرکنش سینماتیکی خاک و سازه، شالوده نواری صلب، توابع امپدانس، حرکت ورودی به شالوده، امواج حجمی.

1- مقدمه

نیمه‌تحلیلی می‌توان به روش ارائه شده Dasgupta و Chopra (1979) اشاره نمود که در آن سطح نیم‌فضا به تعدادی المان خطی تقسیم شده و هر بار تنش هارمونیک و یکنواختی به هر یک از این المان‌ها اعمال گردیده و جابه‌جایی هر گره در اطراف این پانل‌های بارگذاری شده با یک روند تحلیلی به دست آورده می‌شود. انتگرال‌های منفرد حاصله در این روش به صورت عددی محاسبه می‌گردند.

از دیگر روش‌های عددی، روش ارائه شده توسط Tzong و همکاران (1981) می‌باشد که در آن شالوده و قسمتی از خاک زیر آن به‌عنوان محدوده نزدیک و با المان محدود مدل‌سازی شده و بقیه توده نیمه‌بی‌نهایت خاک، به‌عنوان محدوده دور در نظر گرفته می‌شود. در این روش محدوده دور با یک‌سری فنر و

سختی دینامیکی یا توابع امپدانس از مطالب مهم و زیربنایی در مسئله اندرکنش خاک و سازه محسوب می‌شود. کاربردهای متعددی از توابع امپدانس می‌توان نام برد که محاسبه پیروید و میرایی مؤثر سازه از آن جمله می‌باشند. با معرفی توابع امپدانس می‌توان توده خاک را با یک‌سری فنر و دمپر وابسته و یا مستقل از فرکانس جایگزین نمود و سپس سازه واقع بر توده خاک را براحتی تحلیل نمود. روش‌های مختلف عددی و تحلیلی را می‌توان برای محاسبه توابع امپدانس به کار برد. به‌طور خلاصه دو دسته نتایج تحلیلی برای توابع امپدانس موجود است. در این راستا به نتایج تحلیلی Luco و Westmann (1972) و همچنین Oien (1971) می‌توان اشاره نمود. از جمله روش‌های



یک تقریب کاملاً مناسب در این زمینه برای شالوده‌های مدفون صلب توسط Iguchi (1982) ارائه گردید. از آنجا که در ساختمان‌های محدودی از ابزار دقیق در محل شالوده استفاده گردیده است، در نتیجه داده‌های تجربی محدودی در این زمینه موجود می‌باشد.

Ishii (1984) با برداشت رکوردهای زلزله در 18 منبع آب نیمه‌مدفون، رابطه‌ای را برای تابع انتقال حرکت انتقالی شالوده ارائه نمود. در همین راستا Chang و همکاران (1985) و همچنین Johnson و همکاران (1993) اطلاعات تجربی دیگری ارائه کردند که در آن تفاوت حرکت آزاد و حرکت ثبت شده در محل شالوده را نشان می‌دهند.

Maleki و همکاران (2023) توسط مدل‌های آزمایشگاهی، اثر جنبه‌های مختلف هندسی بر تابع امیدانس افقی شالوده‌های سطحی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نسبت عمق فرورفتگی شالوده در خاک به‌طور قابل توجهی بر توابع امیدانس تأثیرگذار است. همچنین بررسی تأثیر اندرکنش سینماتیک به-کمک آزمایشات مقیاس بزرگ نیز صورت گرفته است.

Belkhir و همکاران (2023) عنوان نمودند که تحت امواج لرزه‌ای شدید، رفتار خاک به‌صورت غیرخطی بوده و در این حالت توابع امیدانس و حرکت ورودی به شالوده را محاسبه نمودند. همچنین Huang و همکاران (2021) تمرکز خود را به پاسخ سازه واقع بر شالوده، تحت امواج لرزه‌ای مختلف گذاشتند. Zhao و همکاران (2021) در تحقیقات خود از المان‌های نامتناهی برای جذب موج منعکس شده در مرز استفاده کردند و فرمولاسیون بار معادل را برای امواج ورودی مایل استخراج کردند. همچنین تأثیر غیرقابل اغماض امواج لرزه‌ای مایل را بر روی پاسخ دینامیکی سازه‌ها نشان دادند.

Sbartai و همکاران (2012) تأثیر مایل بودن امواج ورودی هارمونیک P، SV، SH و R بر پاسخ لرزه‌ای یک شالوده صلب سه-بعدی بر روی سطح خاک ویسکوالاستیک محدود شده توسط سنگ بستر را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که امواج ورودی مایل باعث ایجاد پیچش، انتقال و چرخش در شالوده شده درحالی‌که امواج ورودی قائم فقط باعث انتقال می‌شوند.

Ding و همکاران (2023) در تحقیقات خود یک راه‌حل عددی برای پاسخ به ارتعاشات قائم شالوده‌های نواری صلب بر روی سطح یک لایه خاک پروالاستیک با ضخامت محدود ارائه نمودند. آن‌ها با استفاده از یک سیستم معادلات خطی بر سهم امواج قائم بر روی پاسخ دینامیکی شالوده نواری صلب تأکید کردند. علاوه بر این، این مدل امکان محاسبه جابه‌جایی خاک در مجاورت شالوده برای ارزیابی اثرات

دمپ‌هایی جایگزین گردیده که مقادیر سختی و میرایی آن‌ها مقادیر حقیقی و مختلط توابع امیدانس محدوده دور بوده و با روش سیستم شناسایی محاسبه می‌گردند.

Tzong و همکاران (1981) اعلام نمودند که نتایج تحلیلی Luco و Westmann (1972) برای فرکانس‌های بالا جواب مناسبی را به‌دست نمی‌دهد و نتایج خود را با نتایج تحلیلی Oien (1971) مقایسه نمودند. با این حال نتایج به‌دست آمده توسط آن‌ها نیز در فرکانس‌های بالا هم‌خوانی خوبی با نتایج تحلیلی Oien (1971) نداشت. در همین راستا Yerli و Deneme (2008) با روش المان مرزی و با استفاده از المان‌های گسسته، توابع نرمی پی‌های سطحی واقع بر توده الاستیک و ویسکوالاستیک را محاسبه نمودند.

Veletsos و همکاران (1974) و نیز Veletsos (1977) به مطالعه نحوه تأثیر خاک به‌عنوان یک بستر انعطاف‌پذیر در پاسخ سازه واقع بر آن پرداختند. حرکتی که در پای سازه تحت زلزله ورودی ایجاد می‌شود با حرکت آزاد زمین یعنی در حالت بدون حضور سازه تفاوت دارد. عامل تفاوت وجود جرم و سختی شالوده بوده که به‌ترتیب تحت عنوان اندرکنش اینرسی و سینماتیک خاک و سازه شناخته می‌شوند.

چنین دسته‌بندی ابتدا توسط Whitman و همکارانش (1976، 1977 و 1978) ارائه گردید. Roesset و همکاران (2013) وجود مؤلفه پیچشی یک شالوده صلب بدون جرم تحت امواج SH را تحت عنوان پیچش نیومارک و یا اثر تاو معرفی کردند. حرکت ورودی یک شالوده صلب مدور که در یک محیط نیم فضا مدفون گشته تحت موج قائم SH با استفاده از روش المان محدود توسط Day (1978) به‌دست آمد.

Morrays و Elsbsee (1977) با همین روند این مسئله را در حالت لایه ویسکوالاستیک خاک واقع بر سنگ بستر تحلیل نمودند. تعمیم این مسئله در حالت شالوده‌های غیر مدور نیز توسط Mita و همکاران (1989) به‌دست آمده است. همچنین Wong و Luco (1978) پاسخ شالوده سطحی تحت امواج مایل SH را محاسبه نمودند.

Dominguez (1978) با استفاده از روش المان مرزی پاسخ شالوده مدفون مربعی را تحت امواج حجمی محاسبه نمود و فیلتر شدن مؤلفه‌های قائم و افقی را نشان داد. Mahsouli و همکاران (2008) نیز با روش زیرسازه و به‌کمک مدل مخروطی پاسخ غیرخطی سازه را در اثر اندرکنش سینماتیک خاک و سازه مورد توجه قرار دادند و به‌منظور ساده‌سازی مسئله، حرکت مؤلفه‌های انتقالی و چرخشی ایجاد شده در تراز شالوده صلب را با یک حرکت افقی معادل جایگزین نمودند. Jahankhah و همکاران (2013) به بررسی اهمیت اثر اندرکنش سینماتیک خاک و سازه به‌ویژه در حالت شالوده‌های مدفون پرداختند. قابل ذکر است که

پارامتری بعد معرفی شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در ادامه، پاسخ زمانمند یک شالوده سطحی به امواج لرزه‌ای SV از نوع ریکر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- روش انجام محاسبات

ابتدا به‌طور خلاصه فرمولاسیون مورد استفاده در روش المان مرزی برای امواج حجمی داخل صفحه (امواج SV و P) و نیز امواج حجمی خارج از صفحه (موج SH) در ادامه آورده شده است. سپس نحوه محاسبه توابع امپدانس و نیز حرکت ورودی به شالوده‌های سطحی توضیح داده می‌شود. پس از صحت‌سنجی توابع امپدانس و حرکت ورودی به شالوده‌های نواری سطحی با نتایج موجود در تاریخچه، تحلیل جامعی از نتایج شامل پاسخ ورودی به شالوده تحت زوایای مختلف برای کلیه امواج حجمی در حوزه فرکانس ارائه می‌گردد. در نهایت به‌عنوان کاربرد عملی نتایج ارائه شده، پاسخ زمانمند یک شالوده نواری تحت موج ریکر به‌دست می‌آید.

3- روش المان مرزی

روش المان مرزی یکی از روش‌های قدرتمند برای تحلیل محیط‌های الاستیک و همگن در حالات استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. از جمله مزیت‌های مهم این روش، مدل‌سازی محیط‌های بی‌نهایت و نیمه‌بی‌نهایت می‌باشد. همچنین این روش برخلاف روش‌های دامنه‌ای موجود نظیر روش المان محدود و یا روش تفاضل محدود جزء روش‌های مرزی محسوب شده و به عبارت دیگر کلیه محاسبات موردنیاز در این روش صرفاً بر روی مرز محیط صورت می‌گیرد. لذا به‌جای مجزاسازی دامنه محیط، صرفاً کفایت مرز محیط مجزاسازی شده و بالطبع بعد المان‌بندی مسئله یک درجه کاهش می‌یابد. البته در شرایطی نظیر غیرخطی بودن رفتار محیط نیاز به مجزاسازی دامنه محیط نیز پیدا می‌شود. با این حال در کاربردهای عملی استفاده از روش المان مرزی در حالت الاستودینامیک منجر به جواب‌های کاملاً قابل قبولی می‌گردد. قابل ذکر است که معادلات انتگرالی مورد استفاده در روش المان مرزی از فرم ضعیف معادله دیفرانسیل حاکم بر محیط به‌دست می‌آید به‌طوری‌که تابع وزن مورد استفاده تابع دلتای دیراک¹ باشد. با صرف‌نظر از نیروی جسم، معادله انتگرالی حاکم در روش المان مرزی در یک محیط الاستیک و همگن دوبعدی با استفاده از تئوری برگشتی بتی به‌صورت رابطه (1) بیان می‌شود. در رابطه (1) ξ معرف نقطه چشمه (نقطه اعمالی بار واحد) و χ معرف نقطه مشاهده (نقطه تحت تأثیر بار واحد) می‌باشد. u_j و p_j به ترتیب جابه‌جایی و ترکشن (تنش

ارتعاشات شالوده به سازه‌های مجاور را نیز فراهم می‌سازد. استفاده از روش المان مرزی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در بحث اندرکنش خاک و سازه توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

Spyrakos (1986) در پژوهش خود پاسخ دینامیکی شالوده‌های نواری را تحت امواج لرزه‌ای مایل با استفاده از روش المان مرزی مستقیم در حوزه زمان به‌دست آورد. این روش از تکنیک‌های حوزه فرکانس سودمندتر است، زیرا پاسخ شالوده گذرا را به‌روشی طبیعی و مستقیم ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنایی برای گسترش به رفتار غیرخطی خاک باشد.

Han و همکاران (2013) از یک روش دقیق انتگرال‌گیری برای تحلیل پاسخ دینامیکی شالوده نواری صلب بر روی خاک چندلایه ناهمسانگرد استفاده کردند. در حوزه فرکانس با تبدیل معادله حاکم بر حرکت موج به شکل بردار دوگانه و تقسیم لایه خاک به n لایه، معادلات دیفرانسیل معمولی مرتبه اول را حل کردند. نتایج حاصل از این روش با نتایج موجود در ادبیات فنی بر اساس روش‌های نیمه‌تحلیلی و روش‌های عددی بر مبنای المان مرزی، مطابقت خوبی نشان داد.

Ba و همکاران (2018) از یک روش المان مرزی غیرمستقیم برای مطالعه توابع امپدانس دینامیکی شالوده نواری مدفون صلب مدفون در یک نیم‌فضای چندلایه ویسکوالاستیک همسانگرد عرضی، استفاده کردند. در روش پیشنهادی این محققین، از توابع گرین نیم‌فضا به‌عنوان حل‌های اساسی استفاده گردید و به کمک تکنیک مورد استفاده، مشکل تکینگی را مرتفع نمودند. نتایج عددی نشان داد که توابع امپدانس برای محیط همسانگرد عرضی به‌طور قابل توجهی متفاوت از توابع حالت همسانگرد است.

Al و همکاران (2021) در تحقیقات خود تعیین حرکت ورودی زمین برای شالوده تحت موج مایل با زاویه ورودی بیشتر از زاویه بحرانی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش ماتریس سختی حوزه فرکانس برای محاسبه نیروی گرهی معادل حرکت ورودی زمین تحت موج مایل SV و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی نیم‌فضای الاستیک استفاده کرده و دقت محاسباتی بالای این روش را تأیید نمودند. تحلیل‌های صورت‌گرفته در تاریخچه برای محاسبه اندرکنش سینماتیکی خاک و سازه عمدتاً مربوط به شالوده‌های مدور واقع بر توده خاک می‌باشد. در این مقاله ابتدا توابع امپدانس شالوده‌های نواری صلب واقع بر توده الاستیک خاک با روش المان مرزی محاسبه می‌شوند و با نتایج تحلیلی مقایسه گردیده و تطابق نتایج عددی و تحلیلی نشان‌دهنده صحت روش عددی پیشنهادی می‌باشد. در ادامه، پاسخ جابه‌جایی شالوده سطحی به امواج ورودی مایل حجمی SV, P و SH با زوایای ورودی مختلف در حوزه فرکانس و برحسب

1. Dirac delta function

و ترکشن در مسائل دوبعدی و در حوزه فرکانس برای مسائل خارج از صفحه² به صورت روابط (8) و (9) می‌باشند.

$$u_z^* = \frac{1}{2\pi} K_0 \left[\frac{i\omega r}{C_S} \right] \quad (8)$$

$$p_z^* = \frac{-1}{2\pi} \frac{i\omega}{C_S} \frac{\partial r}{\partial n} K_1 \left(\frac{i\omega r}{C_S} \right) \quad (9)$$

برای محاسبه رابطه انتگرالی در معادله (1)، لازم است ابتدا مرز محیط را به یک سری المان‌های مرزی مجزاسازی کرد. در اینجا المان‌های سه‌گره‌ای در نظر گرفته و فرم مجزا شده رابطه انتگرالی به صورت رابطه (10) به دست می‌آید.

$$[C_q]\{u_q\} + \sum_{e=1}^{ne} \left\{ \int_{L_e} [p^*][N]dL_e \right\} \{u^e\} = \sum_{e=1}^{ne} \left\{ \int_{L_e} [u^*][N]dL_e \right\} \{p^e\} \quad (10)$$

$\{u_q\}$ بردار جابه‌جایی گره شماره q بوده که برای مسائل دوبعدی خارج و داخل صفحه به ترتیب شامل یک و دو مؤلفه می‌باشد. همچنین ne تعداد المان‌های مرزی، dL_e طول المان e ام، $[N]$ ماتریس توابع شکل و $[C_q]$ ماتریسی حاوی مؤلفه‌های ترم جهش گره q ام بوده که برای مرزهای هموار³ به ترتیب برای مسائل دو بعدی خارج و داخل صفحه برابر $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}$ خواهد بود. δ_{ij} نیز دلتای کرونکر⁴ می‌باشد. بردارهای $\{u_e\}$ و $\{p_e\}$ به ترتیب شامل مقادیر گره‌ای جابه‌جایی و ترکشن المان e ام می‌باشند. انتگرال بر روی هر المان مرزی در مختصات محلی و به کمک نقاط گوس صورت می‌گیرد. با به کار بردن رابطه (10) در هر گره مرزی، معادلات جبری خطی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$[F]\{u\} = [G]\{p\} \quad (11)$$

که $[F]$ و $[G]$ ماتریس‌های ضرائب تأثیر و بردارهای $\{u\}$ و $\{p\}$ به ترتیب بردارهای جابه‌جایی و ترکشن کلیه نقاط مرزی می‌باشند. با مرتب کردن مقادیر معلوم و مجهول در رابطه (11) دستگاه معادلات خطی حاصل شده و در نهایت مقادیر جابه‌جایی و تنش سطحی مجهول گره‌ای به کمک آن محاسبه می‌گردد. از آنجا که در روش المان مرزی و در مسائل انتشار امواج هیچ نرم-افزاری وجود ندارد، از برنامه‌نویسی فرمولاسیون موجود استفاده گردیده و همانند دیگر مقالات موجود در این زمینه که در مراجع

سطحی) نقاط روی مرز در راستای z می‌باشند. dL_e نمو طول بر روی مرز بوده که به صورت مثلثاتی پیموده می‌شود. c_{ij} نیز ترم جهش می‌باشد. قابل ذکر است که روابط (1) تا (11) از مرجع Dominguez (1993) اقتباس شده است.

$$c_{ij}(\xi)u_j(\xi) + \int_S p_{ij}^*(\xi, \chi)u_j(\chi)dL_e = \int_S p_j(\chi)u_{ij}^*(\xi, \chi)dL_e \quad (1)$$

$u_{ij}^*(\xi, \chi)$ و $p_{ij}^*(\xi, \chi)$ به ترتیب حل‌های اساسی جابه‌جایی و ترکشن بوده که معرف جابه‌جایی و ترکشن در نقطه مشاهده χ و در راستای z به ازای بار واحد اعمالی در نقطه چشمه و در راستای i می‌باشند. حل‌های اساسی جابه‌جایی و ترکشن در مسائل دو-بعدی و در حوزه فرکانس برای مسائل صفحه‌ای¹ به صورت زیر می‌باشند:

$$u_{ij}^* = \frac{1}{2\pi\rho C_S^2} [\psi\delta_{ij} - \chi r_{,i}r_{,j}] \quad (2)$$

$$p_{ij}^* = \frac{1}{2\pi} \begin{bmatrix} \left(\frac{C_p^2}{C_S^2} - 2 \right) \left(\frac{\partial\psi}{\partial r} - \frac{\partial\chi}{\partial r} \right) r_{,i}n_j + \left(-\frac{1}{r}\chi \right) \left(\frac{\partial\psi}{\partial r} - \frac{\partial\chi}{\partial r} \right) \left(\delta_{ij} \frac{\partial r}{\partial n} + r_{,j}n_i \right) - 2\frac{\chi}{r} \left(\frac{n_j r_{,i} - 2r_{,i}r_{,j}}{\frac{\partial r}{\partial n}} \right) - 2\frac{\partial\chi}{\partial r} r_{,i}r_{,j} \frac{\partial r}{\partial n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\psi = K_0 \left(\frac{i\omega r}{C_S} \right) + \frac{C_S}{i\omega r} \left[K_1 \left(\frac{i\omega r}{C_S} \right) - \frac{C_S}{C_P} K_1 \left(\frac{i\omega r}{C_P} \right) \right] \quad (4)$$

$$\chi = K_2 \left(\frac{i\omega r}{C_S} \right) - \frac{C_S^2}{C_P^2} K_2 \left(\frac{i\omega r}{C_P} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial r} = -\frac{i\omega}{C_S} K_1 \left(\frac{i\omega r}{C_S} \right) + \frac{C_S}{i\omega r} \left[-\frac{i\omega}{C_S} K_2 \left(\frac{i\omega r}{C_S} \right) + \frac{C_S}{C_P} \frac{i\omega}{C_P} K_2 \left(\frac{i\omega r}{C_P} \right) \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial\chi}{\partial r} = -\frac{i\omega}{C_S} K_1 \left(\frac{i\omega r}{C_S} \right) - \frac{2}{r} K_2 \left(\frac{i\omega r}{C_S} \right) + C_P^2 K_1 \left(\frac{i\omega r}{C_P} \right) + \frac{2}{r} \frac{C_S^2}{C_P^2} K_2 \left(\frac{i\omega r}{C_P} \right) \quad (7)$$

که ρ چگالی، K_0 ، K_1 و K_2 به ترتیب توابع شبه بسل نوع دوم از درجه صفر، یک و دو می‌باشند. همچنین r فاصله نقطه چشمه و مشاهده و ω ، C_S و C_P به ترتیب فرکانس زاویه‌ای، سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری می‌باشند. حل‌های اساسی جابه‌جایی

همچنین کلیه مؤلفه‌های توابع امپدانس وابسته به پارامتر بی بعد a_0 می‌باشند. پارامتر a_0 به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$a_0 = \frac{\omega B}{C_S} \quad (14)$$

در رابطه بالا ω فرکانس ارتعاش شالوده، C_S سرعت موج در توده خاک می‌باشد. به عبارت دیگر فرکانس بی بعد a_0 به هندسه شالوده و نیز خواص خاک وابسته است. همچنین می‌توان جابه‌جایی‌های هارمونیک را بر حسب نیروهای متناظر، مطابق رابطه زیر بیان نمود. ماتریس نشان داده شده در این رابطه ماتریس نرمی¹ نام داشته که وارون ماتریس توابع امپدانس بوده و مؤلفه‌های آن توابع نرمی شالوده می‌باشند.

$$\begin{Bmatrix} \Delta_V \\ \Delta_H \\ \Delta_R/B \\ \Delta_Z \end{Bmatrix} \frac{1}{G} \begin{bmatrix} C_{VV}(a_0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{HH}(a_0) & C_{HR}(a_0) & 0 \\ 0 & C_{RH}(a_0) & C_{RR}(a_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{ZZ}(a_0) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V \\ H \\ R/B \\ Z \end{Bmatrix} \quad (15)$$

با توجه به وجود توده‌های نیمه‌بی‌نهایت در مسئله، کلیه توابع امپدانس و یا نرمی به صورت عددی مختلط بیان شده و دارای مقادیری موهومی می‌باشند. قابل ذکر است که مقدار حقیقی توابع امپدانس معرف هم‌فاز بودن نیرو و جابه‌جایی و مقدار مختلط آن‌ها نشان‌دهنده یک اختلاف فاز به میزان 90° بین نیرو و جابه‌جایی می‌باشد. بنابراین مقادیر حقیقی توابع امپدانس معرف سختی سیستم بوده که با فنر شبیه‌سازی می‌شود و مقادیر مختلط آن‌ها معرف میرایی تشعشعی سیستم بوده و با دمپر مدل‌سازی می‌گردد. در مسئله اندرکنش خاک و شالوده سطحی، توده خاک به کمک توابع امپدانس با یکسری فنر و دمپر قائم و چرخشی و نیز افقی در دو راستا (درون صفحه و خارج از صفحه)، جایگزین شده به طوری که مقادیر سختی و میرایی این فنر و دمپرها ثابت نبوده و تابع فرکانس بی بعد a_0 می‌باشند.

5- محاسبه توابع امپدانس و حرکت ورودی به شالوده

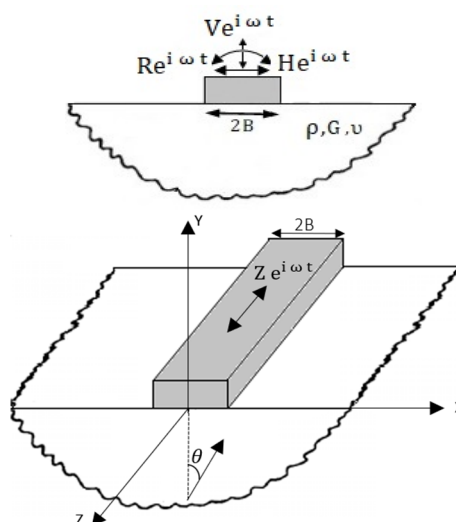
نواری واقع بر توده بی‌نهایت خاک با روش المان مرزی

در این قسمت به محاسبه توابع امپدانس و حرکت ورودی به شالوده نواری واقع بر توده نیم‌فضای خاک پرداخته می‌شود (شکل 2). در اینجا توده خاک یک محیط الاستیک، همگن و ایزوتروپیک فرض می‌شود. همچنین در اینجا شرط گیرداری شالوده و خاک در نظر گرفته شده است، یعنی هیچ لغزشی بین شالوده و خاک وجود نداشته باشد. به عبارت دیگر جابه‌جایی یک نقطه از خاک در زیر شالوده و بر روی خاک با جابه‌جایی نقطه متناظر آن بر روی شالوده کاملاً یکسان باشد. به منظور دستیابی به توابع امپدانس شالوده نواری صلب به کمک روش عناصر مرزی،

موجود است، به طور معمول روابط تئوریک به طور مختصر ارائه می‌گردد که در اینجا نیز از این روند معمول تبعیت شده است.

4- معرفی توابع امپدانس شالوده نواری

شکل (1) مقطع عرضی یک شالوده صلب نواری با عرض $2B$ را نشان می‌دهد که بر روی توده نیم‌فضای الاستیک، همگن و ایزوتروپیک ارتعاش می‌کند. دانسیته توده خاک ρ ، مدول برشی G و ضریب پواسون ν فرض می‌شود. در حالت دوبعدی، چهار درجه آزادی برای شالوده متصور بوده که عبارتند از جابه‌جایی قائم Δ_V ، جابه‌جایی افقی Δ_H و چرخش شالوده Δ_R و نیز جابه‌جایی در جهت خارج از صفحه Δ_Z که در شکل (1) نشان داده شده است. نیروهای هارمونیک متناظر این جابه‌جایی‌ها به ترتیب V ، H ، R و Z در نظر گرفته می‌شوند. رابطه (12) بین این نیروها و جابه‌جایی‌ها برقرار می‌باشد.

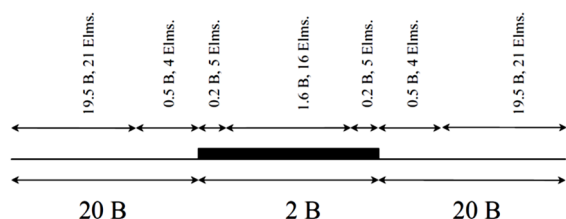


شکل 1- شالوده نواری واقع بر توده الاستیک خاک تحت نیروهای هارمونیک افقی، قائم و چرخشی و خارج از صفحه

$$\begin{Bmatrix} V \\ H \\ R \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{VV}(a_0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH}(a_0) & K_{HR}(a_0) & 0 \\ 0 & K_{RH}(a_0) & K_{RR}(a_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{ZZ}(a_0) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_V \\ \Delta_H \\ \Delta_R \\ \Delta_Z \end{Bmatrix} \quad (12)$$

مؤلفه‌های موجود در ماتریس فوق توابع امپدانس می‌باشد. همان‌طور که در رابطه (12) نشان داده شده است، نیروی قائم V تنها باعث جابه‌جایی Δ_V در راستای قائم می‌گردد در حالی که نیروهای افقی و ممان باعث ایجاد جابه‌جایی در راستاهای دیگر نیز می‌گردند. بنابراین ترم‌های K_{RH} و K_{HR} ترم‌های کوپل بوده و در حالت کلی مخالف صفر می‌باشند. همچنین به علت وجود تقارن در ماتریس سختی خواهیم داشت:

$$K_{HR} = K_{RH} \quad (13)$$

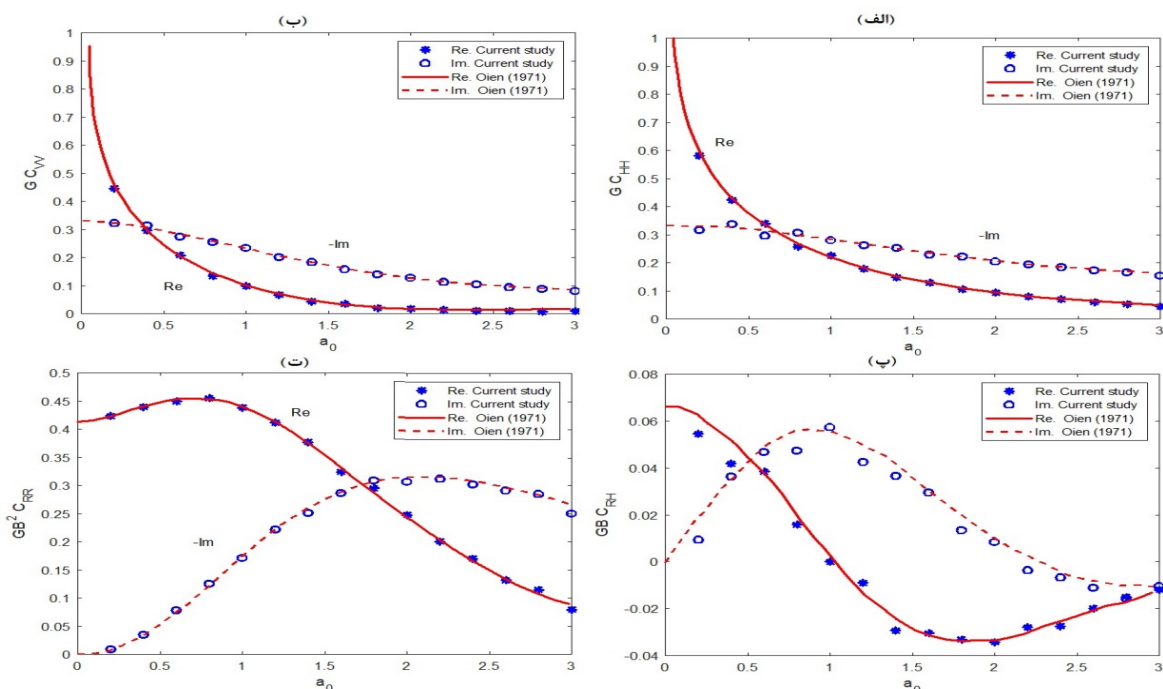


شکل 2- نحوه تقسیم‌بندی ناحیه زیر شالوده و نقاط اطراف آن برای محاسبه توابع نرمی

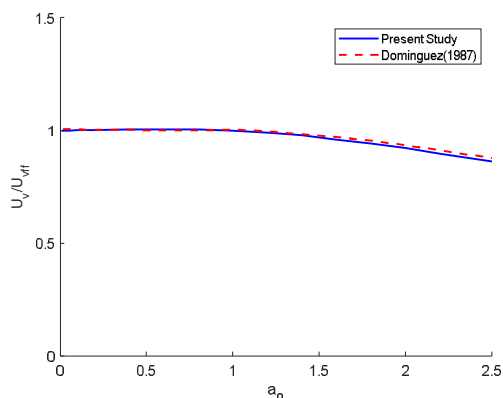
6- صحت‌سنجی نتایج

در شکل (3) مقادیر حقیقی و مختلط توابع نرمی با نتایج تحلیلی توسط Oien (1971) مقایسه شده است. به منظور مقایسه مقادیر ترم کوپل، نتایج به دست آمده از اعمال جابه‌جایی افقی واحد (C_{RH}) به عنوان جواب ترم نرمی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هم‌خوانی خوبی بین نتایج حاصل و نتایج تحلیلی وجود دارد. شکل (4-الف) و (4-ب) مؤلفه‌های حقیقی و مختلط امپدانس در راستای Z شالوده نواری تحت موج SH را در مقایسه با LUCO و همکاران (1975) نشان می‌دهد. در اینجا نیز تطابق قابل قبولی برقرار است. نتایج موجود در تاریخچه برای حرکت ورودی به شالوده عمدتاً مربوط به شالوده‌های مربعی و دایروی می‌باشد و چنین نتایجی برای شالوده‌های نواری بسیار محدود می‌باشد.

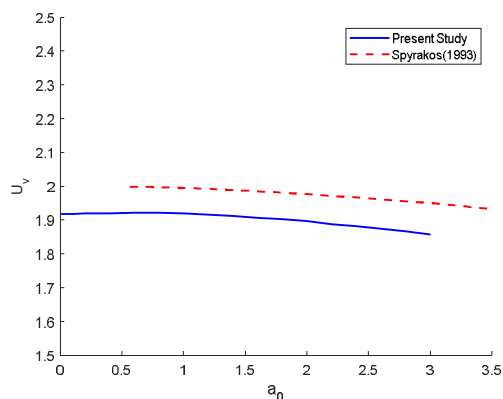
کافیست یک جابه‌جایی واحد در هر یک از راستاهای درجات آزادی شالوده اعمال نموده و نیروهای قائم، افقی و ممان را از روی ترکشن ایجاد شده در زیر شالوده و به کمک روابط تعادل بدست آوریم. برای محاسبه حرکت ورودی به شالوده در اثر گسیل امواج حجمی P ، SV و SH نیز کافیست شرط صلبیت شالوده برای گره‌های واقع در زیر آن اعمال شود. در اینجا ضریب پواسون توده خاک مقدار معمول $\frac{1}{3}$ فرض شده است. همچنین به منظور دستیابی به جواب‌ها با دقت کافی، لازم است محدوده‌ای به اندازه $20B$ در اطراف شالوده در مدل‌سازی منظور گردد. از جمله مزایای روش المان مرزی، مدل‌سازی توده‌های بی‌نهایت و نیمه‌بی‌نهایت می‌باشد. بدین منظور Ahmad و همکاران (1988) از مرزهای مجازی استفاده نمودند. اما در اینجا با توجه به نیمه-بی‌نهایت توده خاک در زیر شالوده سطحی نواری، به عنوان گزینه‌ای جایگزین کافیست $0.5\delta_{ij}$ به عنوان ماتریس $[C_q]$ در نظر گرفته شود. در مدل‌سازی شالوده سطحی در برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب، عناصر مرزی مربوطه از 155 گره و 76 المان سه‌گره‌ای استفاده گردیده است. در شکل (2) تعداد المان‌ها در محدوده داخل و اطراف شالوده نشان داده شده است. لازم به ذکر است به علت پدیده تمرکز تنش، تراکم المان‌ها همان‌طور که در این شکل نشان داده شده در اطراف گوشه‌های شالوده از بقیه محدوده‌ها بیشتر است.



شکل 3- امپدانس شالوده نواری بر روی نیم‌فضای الاستیک و نتایج تحلیلی: الف) قائم، ب) قائم، پ) ترم کوپل C_{RH} ، ت) چرخش



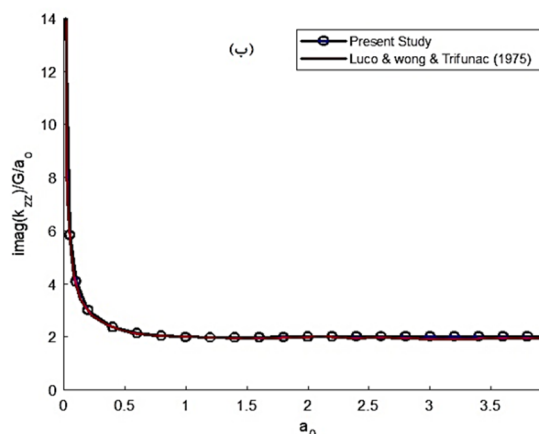
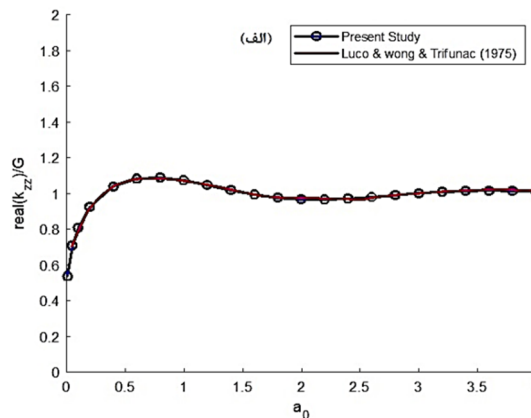
شکل 5- جابه‌جایی قائم شالوده نواری تحت موج P و $v = 0.4$ و $\theta = 60^\circ$



شکل 6- جابه‌جایی قائم شالوده نواری تحت موج P و $\theta = 15^\circ$ و $v = 0.25$

7- اندرکنش سینماتیک خاک و سازه

در هنگام وقوع زلزله، خاک و سازه واقع بر آن مرتفع می‌شوند. ارتعاشات خاک و سازه مستقل از هم نبوده و با یکدیگر اندرکنش دارند (Miura (2000)). در هر حال، اندرکنش خاک و سازه از طریق شالوده صورت می‌گیرد و این تأثیر متقابل به خصوصیات دینامیکی خاک و سازه بستگی دارد. به عبارت دقیق‌تر می‌توان اندرکنش خاک و سازه را اندرکنش خاک و شالوده نامید و در یک تحلیل دقیق‌تر اندرکنش خاک، شالوده و سازه را مورد بررسی قرار داد. همان‌طور که اشاره گردید اندرکنش خاک و سازه شامل اندرکنش اینرسی و اندرکنش سینماتیک می‌باشد. بنابراین شالوده از یک طرف به علت داشتن سختی، موج ورودی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث تغییر در میدان آزاد توده خاک می‌گردد. همچنین به علت داشتن جرم، باعث ایجاد نیرو و لنگر در مرز شالوده و خاک می‌گردد. در اینجا جنبه سختی شالوده و اندرکنش سینماتیک خاک و سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی اندرکنش سینماتیک خاک و سازه، تنها سختی شالوده مدنظر بوده و شالوده بدون جرم در نظر گرفته می‌شود.

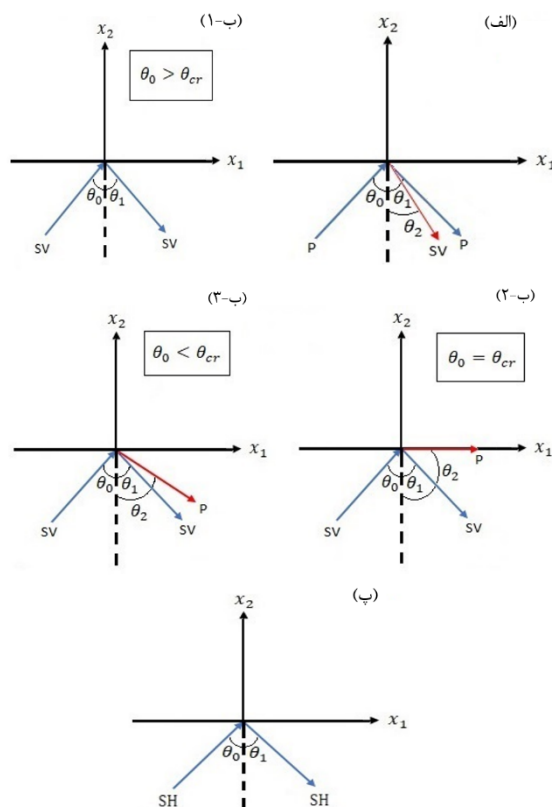


شکل 4- (الف) مؤلفه حقیقی سختی دینامیکی در راستای z شالوده، (ب) مؤلفه موهومی سختی دینامیکی در راستای z شالوده

شکل (5) نتایج جابه‌جایی قائم شالوده نواری برای موج مایل P با $\theta = 60^\circ$ را در مقایسه با نتایج Dominguez (1987) نشان می‌دهد. محور قائم معرف جابه‌جایی قائم بوده که نسبت به جابه‌جایی میدان آزاد زمین که برای این مایلیت راستای موج و ضریب پوواسون $v = 0.4$ برابر با $1/1399$ می‌باشد، نرمالایز شده است. تطابق مناسب به دست آمده در همین شکل قابل مشاهده می‌باشد. به عنوان موردی دیگر از صحت سنجی شالوده سطحی، نتایج جابه‌جایی قائم شالوده نواری برای موج مایل P با $\theta = 15^\circ$ در شکل (6) نشان داده شده و با نتایج Spyrakos (1993) مقایسه شده است. قابل ذکر است که نقطه شروع منحنی متناظر با فرکانس بی‌بعد $a_0 = 0$ معرف جابه‌جایی میدان آزاد زمین می‌باشد. جواب تحلیلی برای موج مایل P با $\theta = 15^\circ$ و ضریب پوواسون $v = 0.25$ برابر $1/92$ به دست می‌آید که دقیقاً منطبق با نتیجه حاصل از روش المان مرزی موجود می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات نتایج حاصله با این منبع مشابه اما تطابق مناسبی بین نتایج به دست نیامده است. قابل ذکر است که در ادبیات فنی به این مرجع خیلی کم اشاره شده است.

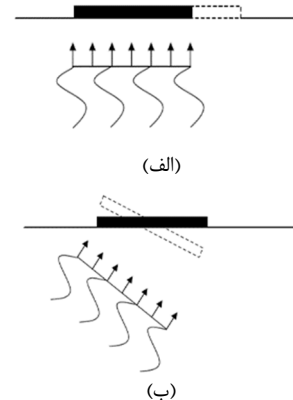
8- شالوده سطحی نواری تحت امواج P، SV و SH با زوایای مختلف

در اینجا با فرض عدم وجود جرم برای شالوده سطحی، حرکت ورودی به شالوده ناشی از امواج P، SV و SH در اثر اندرکنش سینماتیک خاک و سازه محاسبه می‌گردد. همانند توابع امپدانس، کلیه نتایج را می‌توان بر حسب فرکانس بی‌بعد ω_0 بیان نمود. از آنجا که پیش‌نیاز محاسبات المان مرزی، پاسخ میدان آزاد ناشی از انتشار امواج مختلف در نیم‌فضا می‌باشد، لذا در ابتدا انتشار امواج حجمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (8) راستای انتشار و انعکاس امواج مختلف P، SV و SH در برخورد با نیم‌فضا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، موج انعکاسی ناشی از انتشار امواج P و SV شامل هر دو نوع موج P و SV می‌باشد. بدین ترتیب شرط بدون تنش بودن سطح زمین نیز ارضا می‌گردد. همچنین از آنجا که موج انعکاسی P ناشی از انتشار موج ورودی SV، با زاویه بزرگتری نسبت به خط قائم ایجاد می‌شود، لذا برای زوایای انتشار بزرگتر از زاویه بحرانی θ_{cr} ، موج P قابلیت انتشار در هوا را نداشته و موج انعکاسی صرفاً شامل موج SV می‌باشد. قابل ذکر است که در انتشار موج SH، موج انعکاسی نیز صرفاً SH با همان زاویه انتشار می‌باشد.



شکل 8- انتشار و انعکاس امواج مختلف در نیم‌فضا
الف) موج P، ب) موج SV، پ) موج SH

در شکل (7-الف) شالوده سطحی تحت امواج برشی با جهت انشار قائم قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این حالت صلبیت شالوده تأثیری در حرکت افقی نقاط سطحی (ناشی از میدان آزاد) نداشته و به‌عبارت دیگر، اندرکنش سینماتیک وجود ندارد. در شکل (7-ب) موج برشی به‌صورت مایل به سمت شالوده سطحی گسیل یافته و هر یک از نقاط زیر شالوده در هر زمان، حرکت مخصوص به‌خود را داشته اما شالوده به‌علت صلبیتش نمی‌تواند از حرکت آزاد زمین تبعیت کند. بنابراین شالوده میانگینی از حرکات نقاط را تجربه کرده که همان حرکت ورودی شالوده می‌باشد. حرکت ورودی به شالوده در حالت کلی شامل مؤلفه‌های افقی، قائم و چرخشی خواهد بود.



شکل 7- اثر اندرکنش سینماتیک خاک و سازه در یک شالوده سطحی تحت امواج برشی: الف) انتشار قائم، ب) جهت انتشار مایل

Aviles و همکاران (1998) مطرح کردند که در صورتی که فرکانس امواج ورودی بسیار کم باشد یا به‌عبارت دیگر طول موج ورودی بسیار بزرگتر از ابعاد شالوده باشد، کل شالوده به‌عنوان یک ذره محسوب شده و بالطبع شالوده از حرکت لرزه‌ای ورودی تبعیت می‌کند و در این حالت نیز اندرکنش سینماتیک خاک و سازه تأثیری در حرکت ورودی شالوده ندارد. بنابراین به‌طور خلاصه انتظار داریم با افزایش فرکانس حرکت لرزه‌ای، حرکت چرخشی اعمال شده به شالوده ناشی از اثر اندرکنش سینماتیک خاک و شالوده زیاد گردد. با این حال، در فرکانس‌های بسیار بالا نیز شالوده قابلیت تبعیت از حرکت رفت و برگشتی اعمالی را نداشته و اثر اندرکنش سینماتیک از بین می‌رود. واضح است که با در نظر گرفتن طیف فوریه رکوردهای لرزه‌ای، مشاهده می‌شود که عملاً فرکانس‌های بالاتر از 25 Hz فیلتر می‌شوند.

جدول 1- دامنه جابه‌جایی افقی و قائم میدان آزاد

زاویه ورودی	جابه‌جایی افقی			جابه‌جایی قائم		
	p	SV	SH	p	SV	SH
0°	0	2	2	2	0	0
15°	0/51	1/94	2	1/93	0/49	0
30°	0/96	3/46	2	1/74	0	0
60°	1/39	0/22	2	1/11	1/68	0
90°	0	0	2	0	0	0

تابش، نرمالایز شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه تابش، مقادیر نرمالایز شده جابه‌جایی افقی و نیز چرخش افزایش یافته اما جابه‌جای نرمالایز شده قائم کاهش می‌یابد. همچنین در محدوده مورد بررسی، تغییرات جابه‌جایی افقی نرمالایز شده تقریباً ثابت اما تغییرات چرخش نرمالایز شده روندی افزایشی دارد. تغییرات جابه‌جایی قائم نیز برای مقادیر $a_0 < 1.5$ تقریباً ثابت می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به رابطه (14)، برای طول موج‌های فشاری بزرگتر از 4 برابر ابعاد شالوده، جابه‌جایی قائم عملاً همان مقادیر میدان آزاد را خواهد داشت.

در شکل (10) مقادیر دامنه جابه‌جایی در راستای افقی، قائم و نیز چرخش شالوده برحسب فرکانس بی‌بعد a_0 برای موج SV نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در اینجا صرفاً برای زوایای ورودی کمتر یا مساوی θ_{cr} می‌باشد. از آنجا که برای زوایای بزرگتر θ_{cr} و حذف امواج P انعکاسی، جهش قابل ملاحظه‌ای در مقادیر نرمالایز شده رخ می‌دهد به طوری که رسم هم‌زمان نمودارها باعث محو اختلاف نتایج دیگر زوایا می‌گردد، لذا از آوردن نتایج برای زاویه ورودی $\theta = 60^\circ$ صرف نظر شده است.

در هر حال در اینجا نیز نتایج نسبت به جابه‌جایی افقی میدان آزاد برای هر زاویه ورودی نرمالایز شده است. همان‌طور که در شکل (10) نشان داده شده با افزایش زاویه موج ورودی، جابه‌جایی افقی نرمالایز شده کمتر گردیده و در عوض دوران شالوده به وجود می‌آید. در اینجا نیز تا محدوده $a_0 < 0.75$ که متناظر با طول موج برشی بزرگتر از 4 برابر عرض شالوده می‌باشد، می‌توان جابه‌جایی افقی نرمالایز شده را برابر مقدار میدان آزاد آن در نظر گرفت. همچنین افزایش و یا کاهش مقادیر جابه‌جایی قائم و دوران شالوده، متناسب با افزایش و یا کاهش زاویه ورودی نمی‌باشد. همچنین در اینجا نیز در محدوده فرکانس بی‌بعد a_0 مورد بررسی، مقدار دوران اعمالی به شالوده صعودی می‌باشد.

در ادامه نیز پاسخ جابه‌جایی نرمالایز شده شالوده نواری به امواج ورودی SH در شکل (11) نشان داده شده است. این جابه‌جایی در واحد طول عمود بر صفحه شالوده نواری می‌باشد. زوایای در نظر گرفته شده برابر $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه ورودی و همچنین افزایش فرکانس بی‌بعد a_0 ، از مقدار جابه‌جایی افقی نسبت به میدان آزاد کاسته شده است. به عبارت دیگر در حالت گسیل امواج SH، در نظر نگرفتن اندرکنش سینماتیک نسبت به میدان آزاد، محافظه کارانه می‌باشد.

مقادیر جابه‌جایی افقی و قائم سطحی برای حرکت میدان آزاد با زوایای $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ برای امواج هارمونیک P، SV و SH و برای ضریب پواسون $\frac{1}{3}$ در جدول (1) نشان داده شده است. در اینجا دامنه موج هارمونیک ورودی مقدار یک در نظر گرفته شده است. مقادیر جابه‌جایی میدان آزاد مستقل از فرکانس بوده و صرفاً بستگی به زاویه انتشار و ضریب پواسون توده خاک دارد. از آنجا که زوایا با راستای قائم سنجیده می‌شوند، لذا زوایای 0° و 90° به ترتیب معرف انتشار قائم و افقی امواج می‌باشند. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، در کلیه زوایای انتشار برای موج SH، دامنه موج سطحی دو برابر می‌گردد. اما برای امواج P و SV می‌توان گفت که در راستای افقی انتشاری نداشته اما در انتشار قائم، بسته نوع موج، یکی از جابه‌جایی‌های افقی و یا قائم، دو برابر دامنه ورودی می‌گردد. همچنین در حالت کلی، در دیگر زوایای امواج ورودی، شاهد ایجاد جابه‌جایی افقی و قائم بوده که مقادیر آن‌ها نظم خاصی نسبت به افزایش و یا کاهش زاویه موج ورودی ندارند. توضیحات مفصل‌تر و نحوه محاسبه زوایای امواج انعکاسی θ_1 و θ_2 برحسب زاویه موج ورودی θ_0 در مراجع مختلف از جمله Achenbakh (1973) آمده است.

بر اساس روند معرفی شده در قسمت قبل، مقادیر دامنه جابه‌جایی در راستای افقی، قائم و نیز چرخش شالوده بر حسب فرکانس بی‌بعد a_0 برای موج P، SV و SH در شکل (9) و (10) و (11) نشان داده شده است. برای تفسیر نتایج حاصله لازم است ابتدا پارامتر بی‌بعد a_0 به صورت زیر برحسب طول موج‌های برشی λ_S و فشاری λ_P بازنویسی شود:

$$a_0 = \frac{\omega B}{C_S} = \frac{\pi(2B)}{\lambda_S} = \frac{2\pi(2B)}{\lambda_P} \quad (16)$$

لازم به ذکر است که ورود طول موج فشاری λ_P در رابطه فوق با فرض ضریب پواسون $\nu = \frac{1}{3}$ صورت گرفته است. همچنین مقادیر متناظر با $a_0 = 0$ معرف میدان آزاد بوده و طبق توضیحات ارائه شده در قبل با افزایش اولیه فرکانس بی‌بعد a_0 ، اثر اندرکنش سینماتیک ظاهر می‌شود.

شکل (9) مربوط به انتشار امواج P با زوایای مختلف می‌باشد. نتایج حاصله نسبت به جابه‌جایی قائم میدان آزاد برای هر زاویه

9- پاسخ زمانمند یک شالوده سطحی تحت جبهه موج مایل SV

با استفاده از نتایج حوزه فرکانس، به سادگی می‌توان اثر سینماتیک خاک و سازه را در حوزه زمان بررسی نمود. در اینجا یک شالوده نواری صلب و بدون جرم با نصف عرض شالوده برابر با $B = 7\text{m}$ بر روی نیم فضای الاستیک با ضریب پواسون $\nu = \frac{1}{3}$ و سرعت موج برشی $C_s = 300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سرعت موج برشی در نظر گرفته شده بسیار کم بوده تا اثر اندرکنش خاک و سازه نمود پیدا کند. حال فرض می‌شود تحریک ورودی از نوع موج SV با زاویه مایلیت 30° باشد. پاسخ میدان آزاد موج مایل SV در حالت کلی باعث ایجاد حرکات افقی و قائم سطحی می‌گردد، اما در حالت خاص در نظر گرفته شده یعنی ضریب پواسون $\frac{1}{3}$ و نیز زاویه موج ورودی 30° ، همان‌طور که در جدول (1) و شکل (10) نیز آورده شده است، حرکت قائم ورودی در میدان آزاد وجود نخواهد داشت و مؤلفه میدان آزاد صرفاً شامل مؤلفه افقی می‌باشد. در اینجا فرض شده که مؤلفه افقی جابه‌جایی از تابع زمانمند موجک ریکر تبعیت کند. معادله موجک ریکر برای جابه‌جایی افقی u به‌عنوان موج ورودی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

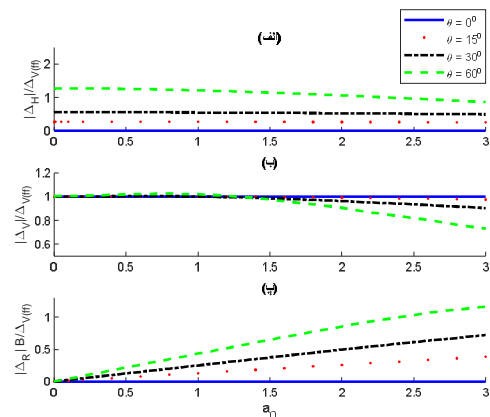
$$u = A_{\max} \left[1 - 2(\pi f_p(t - t_0))^2 \right] e^{-(\pi f_p(t - t_0))^2} \quad (17)$$

در این معادله، A_{\max} دامنه موجک، f_p فرکانس غالب موج و t_0 پارامتر انتقال زمان بوده که در شکل (12) ضمن ترسیم موجک ریکر در حوزه زمان و فرکانس، مقادیر این پارامترها نیز نشان داده شده است. روند محاسبه پاسخ زمانمند بر اساس تبدیل فوریه و تکنیک FFT¹² بوده که مراحل محاسبات آن در جدول (2) خلاصه شده است.

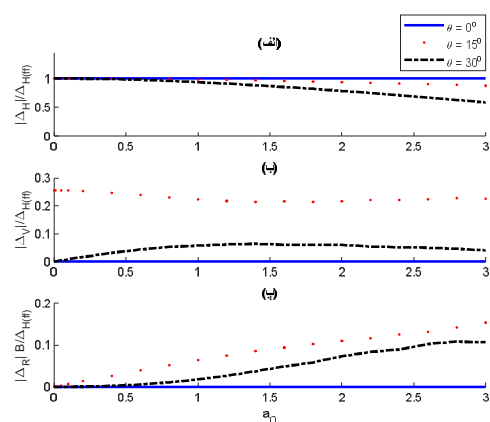
جدول 2- مراحل محاسبه پاسخ زمانمند به کمک تبدیل فوریه

H_j	محاسبه تابع پاسخ مختلط سیستم در فرکانس j ام و شامل N فرکانس
$P_j = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_n e^{-i(j2\pi n/N)}$	محاسبه تبدیل فوریه سیگنال ورودی در فرکانس j ام
$U_j = H_j P_j$	محاسبه پاسخ جابه‌جایی در فرکانس j ام
$u_n(t) = \sum_{j=0}^{N-1} U_j e^{i(2\pi n j/N)}$	عکس تبدیل فوریه و محاسبه پاسخ جابه‌جایی زمانمند

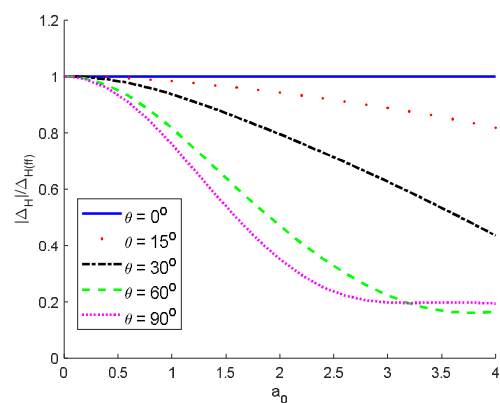
نتایج پاسخ شالوده در شکل (13) نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت شاهد کاهش جابه‌جایی افقی و ظهور



شکل 9- پاسخ شالوده سطحی به امواج برشی P مایل برای $\nu = \frac{1}{3}$ (الف: 0° ، ب: 15° ، پ: 30° ، ت: 60°)



شکل 10- پاسخ شالوده سطحی به امواج برشی SV برای $\nu = \frac{1}{3}$ (الف: جابه‌جایی افقی، ب: جابه‌جایی قائم، پ: دوران)



شکل 11- پاسخ شالوده سطحی به امواج برشی SH (الف: 0° ، ب: 15° ، پ: 30° ، ت: 60° ، ث: 90°)

مدل سازی شالوده سطحی، لازم گردید محدوده‌ای در حدود 20 برابر نصف عرض شالوده در اطراف آن وارد مدل سازی گردد. در ابتدا توابع امپدانس و در ادامه پاسخ شالوده نواری صلب در برابر امواج قائم و مایل P، SV و SH مورد بررسی قرار گرفت. امواج حجمی در نظر گرفته شده هارمونیک و دارای دامنه واحد فرض شده اند. برای شالوده سطحی نواری، کلیه نتایج برحسب فرکانس بی بعد a_0 قابل بیان می‌باشد. همچنین کلیه نتایج برای ضریب پواسون $\frac{1}{3}$ محاسبه شدند.

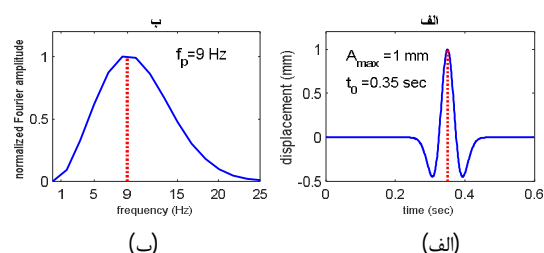
برای امواج حجمی P و برای کلیه زوایای انتشار غیر قائم، پاسخ دامنه جابه‌جایی قائم نسبت به همان پاسخ در حالت میدان آزاد، همواره کاهش داشته و در عوض دوران شالوده مشاهده می‌شود به طوری که با افزایش زاویه انتشار، مقدار کاهش جابه‌جایی قائم و نیز دوران بیشتر خواهد بود. حداکثر اختلاف برای فرکانس بی بعد 3 برای موج P و صرفاً مؤلفه قائم با زوایای مختلف 15° ، 30° ، 60° به ترتیب برابر با 6٪، 20٪، 55٪ می‌باشد.

برای امواج حجمی SV نیز به جز حالت انتشار قائم، پاسخ دامنه جابه‌جایی افقی همواره نسبت به پاسخ جابه‌جایی میدان آزاد، کاهش داشته و در اینجا نیز شالوده، دوران را نیز تجربه خواهد کرد. همچنین در حالت کلی، مؤلفه قائم جابه‌جایی بسته به پارامتر بی بعد a_0 می‌تواند نسبت به پاسخ میدان آزاد، افزایش و یا کاهش داشته باشد.

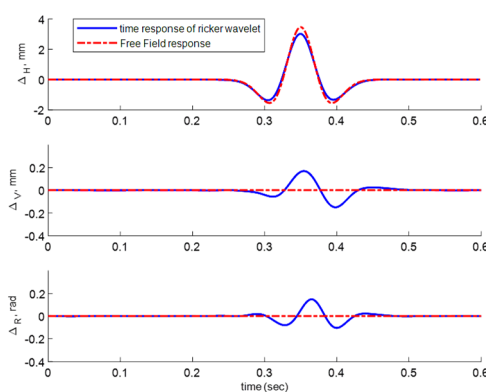
از آنجا که در انتشار مایل امواج P و SV همواره به ترتیب مؤلفه قائم و افقی کاهش و مؤلفه چرخشی ظهور می‌کند، لذا پاسخ نهایی سازه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه میتواند محافظه کارانه (پاسخ بیشتر از حالت میدان آزاد) و یا غیرمحافظه کارانه (پاسخ کمتر از حالت میدان آزاد) باشد. حداکثر اختلاف برای فرکانس بی بعد 3 برای موج SV و صرفاً مؤلفه قائم با زوایای مختلف 15° ، 30° به ترتیب برابر با 12٪، 41٪ می‌باشد. در حالت انتشار مایل SH موج نیز همواره مؤلفه افقی شالوده نسبت به میدان آزاد کاهش یافته و لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک و سازه منجر به تحلیلی بهینه خواهد شد. حداکثر اختلاف برای فرکانس بی بعد 3 برای موج SH و صرفاً مؤلفه قائم با زوایای مختلف 15° ، 30° ، 60° ، 90° به ترتیب برابر با 12٪، 38٪، 78٪، 81٪ می‌باشد.

در نهایت به منظور لحاظ نمودن اثر اندرکنش سینماتیک خاک و سازه در حالت زمانمند، نمی‌توان رکورد میدان آزاد را مستقیماً به شالوده اعمال نمود، بلکه در اثر سختی شالوده، رکورد میدان آزاد تغییر نموده و علاوه بر آن مؤلفه‌های دیگری مانند چرخش نیز هم‌زمان باید به شالوده اعمال گردد.

جابه‌جایی قائم و نیز چرخش را در شالوده هستیم. جابه‌جایی‌های محاسبه شده در اثر سینماتیک را بایستی به عنوان حرکت ورودی به شالوده در نظر گرفت و سازه را تحت این جابه‌جایی‌های بستر تحلیل نمود. قابل ذکر است که با توجه به کاهش حرکت افقی ورودی و ایجاد حرکات قائم و چرخشی نسبت به حرکت آزاد زمین، پیش‌بینی افزایش و یا کاهش پاسخ سازه با در نظر گرفتن و یا در نظر نگرفتن اثر اندرکنش سینماتیک خاک و سازه، بعد از تحلیل دقیق هر دو حالت مشخص می‌گردد. البته برای سازه‌های بلند، ایجاد چرخش شالوده منجر به دریافت قابل توجه خواهد شد و علی‌رغم کاهش حرکت افقی، می‌تواند در افزایش پاسخ سازه تأثیر گذارتر باشد.



شکل 12- الف) موج ریکر در حوزه زمان، ب) موج ریکر در حوزه فرکانس



شکل 13- پاسخ زمانمند شالوده سطحی به موجک ریکر به همراه پاسخ میدان آزاد

10- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، کارایی روش المان مرزی در مسئله اندرکنش سینماتیکی خاک و سازه مورد بررسی قرار گرفت. مزیت مهم این روش در مدل سازی توده‌های بی‌نهایت و نیمه‌بی-نهایت خاک در قالب محاسبه توابع امپدانس و نیز حرکت ورودی به شالوده نواری صلب نشان داده شد. استفاده از تکنیک‌هایی همچون گره‌های مجازی در این روش منجر به جواب‌های مناسبی در نتایج می‌گردد. همچنین برای حصول به جواب‌های دقیق، در

11- مراجع

- Han Z, Zhou M, Zhou X, Yang L, "Dynamic response of 3D surface/embedded rigid foundations of arbitrary shapes on multi-layered soils in time domain", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2019, 19 (09), 1950106.
- Huang B, Guo J, Liao K, Zhao Y, "Fragility analysis of RC frame structures subjected to obliquely incident seismic waves", *Sustainability*, 2021, 13 (3), 1108.
- Iguchi M, "An approximate analysis of input motions for rigid embedded foundations", *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 1982, 315, 61-75.
- Ishii K, Itoh T, Suhara J, "Kinematic interaction of soil-structure system based on observed data", *Proceeding. 8th World Conference of Earthquake Engineering*, 1984, 3, 1017-1024.
- Jahankhah H, Ghannad M, Rahmani M, "Alternative solution for kinematic interaction problem of soil-structure systems with embedded foundation", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2013, 22 (3), 251-266.
- Ji ZH, Can-xing T, Guo-Tao Y, Zhen-ning B, JiAN-wen L, "Realization of ground motion input in abaqus for layered foundation under SV wave of oblique incidence over critical angle", *Engineering Mechanics*, 2021, 38 (4), 200-210. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750>
- Johnson James J, Alejandro P, "Soil-Structure interaction (ssi): observations, data, and correlative analysis", *Developments in Dynamic Soil-Structure Interaction*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1993, 219-258.
- Kausel E, "Soil-structure interaction Soil Dynamics for Earthquake Design", *International Centre for Computer-aided Design (ICCAD)*, Santa Margherita, Italy, 1976.
- Kausel E, Whitman RV, Morray JP, Elsabee F, "The spring method for embedded foundations", *Nuclear Engineering and Design*, 1978, 48, 377-392.
- Lin G, Han Z, Zhong H, Li J, "A precise integration approach for dynamic impedance of rigid strip footing on arbitrary anisotropic layered half-space", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 49, 96-108.
- Luco JE, Westmann RA, "Dynamic response of a rigid footing bonded to an elastic half space", *Journal of Applied Mechanics*, 1972, ASME, 39 (E2), 527-534.
- Luco JE, Wong HL, Trifunac MD "A note on the dynamic response of rigid embedded foundations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1975, 4, 119-127.
- Mahsouli M, Ghannad MA, "The effect of foundation embedment on inelastic response of structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 38 (2), 423-437.
- Maleki J, Jafarzadeh F, "Model tests on determining the effect of various geometrical aspects on horizontal impedance function of surface footings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2023. <https://doi.org/10.24200/SCI.2023.59744.6403>. (In press)
- Messioud S, Sbartai B, Dias D, "Effect of seismic oblique waves on dynamic response of an embedded
- Achenbach JD, "Wave propagation in elastic soilids", 1973, North-Holland, Amsterdam.
- Ahmad S, Banerjee PK, "Multi-domain bem for two-dimensional problems of elastodynamics", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1988, 26 (4), 891-911.
- Aviles J, Perez-Rocha, LE, "Effects of foundation embedment during building-soil interaction", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, 27, 1523-1540.
- Ba Z, Fu J, Wang F, Wang Y, "Three-dimensional dynamic response analysis of rigid foundation embedded in layered transversely isotropic half-space", *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, 26 (16), 8611-8628.
- Ba ZH, Liang J, Lee VW, Hu L, "IBEM for impedance functions of an embedded strip foundation in a multi-layered transversely isotropic half-space", *Journal of Earthquake Engineering*, 2018, 22 (8), 1415-1446.
- Bayat M, Kia M, Ahmadi HR, "Nonlinear frequency analysis of beams resting on elastic foundation using max-min approach", *Geomechanics and Engineering*, 2018, 355-361.
- Belkhir H, Sbartai B, Filali K, Messioud S, "Linear equivalent seismic response of a surface foundation excited by an SH harmonic wave", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2023, 27 (13), 3881-3898.
- Chang CY, Power MS, Idriss IM, Somerville PG, Silva W, Chen PC, "Engineering characterization of ground motion, Task II. Observational data on spatial variations of earthquake ground motion", 1986, 3, No. NUREG/CR-3805-Vol. 3. Woodward-Clyde Consultants, Walnut Creek, CA (USA); Interpacific Technology, Inc., Oakland, CA (USA).
- Dasgupta G, Chopra AK, "Dynamic stiffness matrices for viscoelastic half planes", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1979, 105.5, 729-745.
- Day SM, "Seismic response of embedded foundations", *Proc. ASCE Convention, Chicago, IL, October, Preprint No. 3450*, 1978.
- Dominguez J, "Boundary elements in dynamics", *Escuela Superior de Ingenieros Industrials Universidad de Sevilla, Computational Mechanics Publications Southampton Boston, Elsevier Applied Science, London New York*, 1993.
- Dominguez J, "Response of embedded foundations to traveling waves", *Research Report R78-24, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA02139*, 1978b.
- Elsabee F, Morray JP, "Dynamic behavior of embedded foundations", *Research Report R77-33. MIT, Department of Civil Engineering, Constructed Facilities*, 1977.
- Goktepe F, Sahin M, Celebi E, "Small shaking table testing and numerical analysis of free-field site response and soil-structure oscillation under seismic loading", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79, 2949-2969.

- Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978, 6 (1), 3-16.
- Yang Z, Zou X, "Horizontal vibration behavior of a rigid disk resting on a viscoelastic soil layer overlying rigid bedrock", Computers and Geotechnics, 2023, 159, 105488.
- Yerli HR, Deneme IO, "Elastodynamic boundary element formulation employing discontinuous curved elements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28, 480-491.
- Zheng Ch, He Y, Kouretzis G, Ding X, "Vertical vibration of rigid strip footings on poroelastic soil layer of finite thickness", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 168, 1078.
- Zhou FY, Xiang WL, Wang HD, Zhu H, Zhou Z, "Torsional and rocking response of the foundation induced by obliquely spatial incident S waves", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130, 105977.
- foundation", ISET Journal of Earthquake Technology, 2012, 520, 49 (1-2), 37-52.
- Mita A, Luco JE, "Impedance functions and input motions for embedded square foundations", Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115, 4, 491-503.
- Miura K, "Dynamic soil structure interaction", International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IISEE), 2000, Lecture Note.
- Oien MA, "Steady motion of a rigid strip bonded to an elastic half space", Journal of Applied Mechanics, ASME, 1971, 38 (E2), 328-334.
- Roesset Jose M, "Soil Structure Interaction the Early Stages", Journal of Applied Science and Engineering, 2013, 16, 1, 1-8.
- Seed H, Bolton, Robert V, Whitman, John Lysmer, "Soil-structure interaction effects in the design of nuclear power plants", Structural and Geotechnical Mechanics, a Volume Honoring Nathan M. Newmark, Prentice-Hall, 1977.
- Spyrakos CC, Strip-foundations, Boundary element techniques in geomechanics, New York: Elsevier Applied Science, 1993, 6, 147-177.
- Spyrakos CC, Beskos DE, "Dynamic response of rigid strip-foundations by a time-domain boundary element method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1986, 23, 1547-1565.
- Tzong TJ, Gupta S, Penzian, J, "Two-dimensional hybrid modelling of soil-structure interaction", Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, 1981.
- Ietsos AS, "Dynamic of structure-foundation systems Structural and geotechnical mechanics", A volume honoring N.M. Newmark, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1977, 333-361.
- Veletsos AS, Meek JW, "Dynamic behavior of building-foundation systems", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 3 (2), 121-138.
- Wong HL, Luco JE, "Dynamic response of rectangular foundations to obliquely incident seismic waves",