

پاسخ لرزه‌ی برون‌صفحه‌ی دره‌ی آبرفتی گوسی

مهدی پنجه‌ی* (استادیار)

سعید مجتبی‌زاده حسناوی (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۱۵-۱۳۰، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، پاسخ لرزه‌ی سطح دره‌ی آبرفتی گوسی شکل در برابر امواج مهاجم برون‌صفحه‌ی SH با زوایای برخورد مختلف ارائه شده است. روش عددی اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان برای تهیه‌ی مدل مذکور پیشنهاد شده است که فقط با گسسته‌سازی وجه میانی دره، قادر به تحلیل محیط با کمیته‌ی المان است. ضمن اشاره‌ی مختصر به فرمول‌بندی روش و تحلیل مثال صحت‌سنجی، الگوی بزرگ‌نمایی سطح دره‌ی آبرفتی گوسی با تکیه بر پارامترهای نسبت امپدانس و شکل در حوزه‌ی زمان/بسامد حساسیت‌سنجی شده است. در ادامه، پاسخ گذرای محیط درونی آبرفت و بستر سنگی پیرامون توسط تصاویر لحظه‌ی در تکمیل نتایج حوزه‌ی زمان نمایش داده شده است. در انتها با تعیین بزرگ‌نمایی بیشینه و برازش خطی، نتایج حاصل در قالب کاربردهای مهندسی جمع‌بندی شده است. رفتارسنجی پاسخ نشان داد که کلیه‌ی پارامترهای ذکر شده در بروز الگوهای مختلف بزرگ‌نمایی سطح حوزه‌ی رسوبی مؤثر هستند، چنانچه بیشینه‌ی خطر برای سازه‌های سطحی در نسبت امپدانس کمیته، نسبت شکل بیشینه و در زوایای تابش قائم و افقی امواج به ترتیب در مرکز و لبه‌ی آبرفت مشاهده شد دستاوردهای حاصل می‌تواند در تکمیل آیین‌نامه‌های لرزه‌ی موجود پیرامون موضوع اثر محلی ساختگاه استفاده شوند.

واژگان کلیدی: اجزاء مرزی نیم‌صفحه، پاسخ لرزه‌ی، حوزه‌ی زمان، دره‌ی آبرفتی گوسی، موج SH.

m.panji@iauz.ac.ir
mojt abazadeh@iauz.ac.ir

۱. مقدمه

مطالعات^[۷-۱۱] با استفاده از روش‌های تحلیلی صورت گرفته و در ادامه، مطالعات دیگری^[۱۵، ۱۶] بر روی پراکنش امواج SH ناشی از دره‌های آبرفتی نیمه‌پر نیم‌دایره‌ی انجام شده است. چندی بعد، برخی پژوهشگران^[۱۷-۱۹] توانستند پاسخ دره‌های نامتقارن را به صورت تحلیلی محاسبه کنند. همچنین، مطالعات دیگری^[۲۰-۲۲]، در راستای تعیین میزان تغییرمکان سطح یک دره‌ی رسوبی در برابر موج SH انجام شده است. برخی دیگر از پژوهشگران^[۲۳-۲۶]، توانسته‌اند با استفاده از روش بسط تابع موج^۶ به بررسی پراکنش موج در حضور دره‌های نیم‌دایره‌ی پردازند. اخیراً، چنگ^۷ و همکاران (۲۰۲۰)^[۲۷] از یک رویکرد نیمه‌تحلیلی برای مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ی دره‌های نیمه‌دایره‌ی استفاده کرده‌اند.

توسعه‌ی مطالعات در حوزه‌ی یاد شده و بروز برخی محدودیت‌ها در روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی از جمله انعطاف‌پذیری کم و حجم بالای معادلات ریاضی حاکم بر آن موجب شده است تا پژوهشگران به سمت روش‌های جایگزین همچون روش‌های عددی روی آورند.^[۲۸] اگرچه در روش‌های عددی، پاسخ به صورت تقریبی حاصل شده است، اما مدل‌سازی مسائل با هندسه‌ی پیچیده و منطبق بر عوارض طبیعی توسط روش‌های عددی امکان‌پذیر است. در حالت کلی، رویکردهای عددی را می‌توان در قالب روش‌های حجمی^۸ و مرزی^۹ تفکیک کرد. در روش‌های حجمی،

قریب به نیم قرن است که پژوهشگران و زلزله‌شناسان در تلاش برای یافتن روش‌های تعیین رفتار لرزه‌ی عوارض توپوگرافی به ویژه عوارض پر شده با مصالح نرم و نقش کلیدی آن بر بزرگ‌نمایی/کوچک‌نمایی^۱ سطح زمین بوده‌اند.^[۱] از جمله مهمترین عوارض مذکور می‌توان به دره‌های آبرفتی اشاره کرد که در طول سال‌های دراز از تجمع رسوب‌ها و نهشته‌های آبرفتی و خاکی با خواص گوناگون شکل گرفته‌اند. امروزه بسیاری از مناطق شهری بر روی این‌گونه دره‌ها احداث شده‌اند که لزوم شناسایی رفتار لرزه‌ی آنها را دو چندان ساخته است.^[۲] در این راستا، مطالعات متعددی بر روی پارامترهای مؤثر و خطر لرزه‌ی ناشی از آنها معطوف شده است.^[۳-۵] از یک سو، شکل‌گیری بنیان آیین‌نامه‌ها و استانداردهای لرزه‌ی مبتنی بر دستاوردهای علمی و از سوی دیگر، نیاز روزافزون به دانش رفتارسنجی عوارض توپوگرافی ناهمگن موجب شده است تا لزوم انجام پژوهش در حوزه‌ی اشاره شده بیش از پیش احساس شود. بدین منظور، پژوهشگران از رویکردهای گوناگون شامل روش‌های تحلیلی^۲، نیمه‌تحلیلی^۳، عددی^۴ و آزمایشگاهی^۵ جهت پژوهش در زمینه‌ی مذکور بهره گرفته‌اند.^[۶] در ابتدا، برخی

* نویسنده مسئول

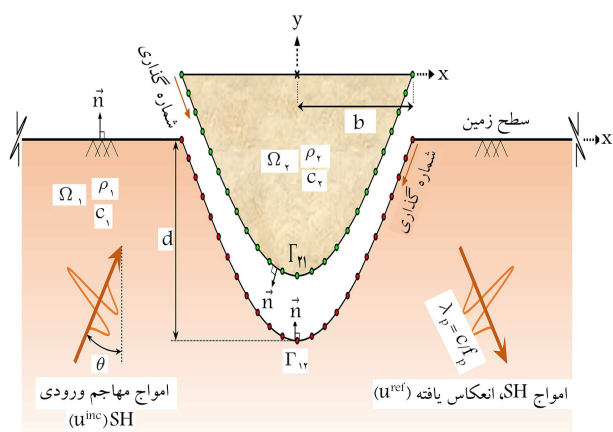
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۹، اصلاحیه ۱۳۹۹/۶/۱۵، پذیرش ۱۳۹۹/۹/۳۰.

DOI:10.24200/J30.2020.56151.2801

همگن محدود شده است. اگرچه برخی پژوهشگران، [۵۶-۶۱] توانسته‌اند فرمول‌بندی ریاضی، پیاده‌سازی عددی، و تحلیل گذرای اجسام دوبعدی غیرهمگن را ارائه کنند، اما پاسخ‌های ارائه شده توسط آن در حوزه‌ی زمان به کمک الگوریتم تبدیل معکوس فوریه/لاپلاس از منظر مسائل مکانیکی حاصل شده است. در پژوهش حاضر، از روش اجزاء مرزی مستقیم نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان برای تحلیل گام‌به‌گام گذرای مسائل آبرفت گوسی شکل استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا هندسه‌ی عارضه در الگوریتم رایانه‌ی که پیشتر با عنوان داسبم (DASBEM) [۲۱، ۵۴]، شناخته شده است، مدل‌سازی شد. سپس، با ارائه‌ی چند مثال اعتبارسنجی، صحت و سقم روش و الگوریتم تهیه شده ارزیابی شد. در ادامه، پیرامون یک مطالعه‌ی پارامتریک جامع، با در نظر گرفتن نسبت امپدانس و شکل دره‌های آبرفتی، الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در زوایای مختلف موج مهاجم حساسیت‌سنجی شد. در نهایت، به منظور کسب یک معیار سنجش، بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی سطح تعیین و با برازش خطی بر آنها، نتایج حاصل در قالب کاربردهای مهندسی جمع‌بندی شده است.

۲. اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان

در شکل ۱، مدل یک دره‌ی آبرفتی گوسی مستقر در یک محیط نیم‌صفحه‌ی همگن کشسان خطی در برابر امواج مهاجم برون‌صفحه‌ی SH مشاهده می‌شود. برای تهیه‌ی مدل اخیر از روش اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان به کمک فرایندهای زیرسازسازی [۲۲] و روش تصویر منبع موج [۲۳، ۶۲] جهت اقتناع شرایط مرزی سطح زمین استفاده شده است. در این حالت، مش‌بندی فقط بر وجه میانی دره متمرکز شده است. همانطور که در شکل ۱ مشهود است، Ω مبین دامنه است که برای محیط پیرامون (سنگ بستر) و دره‌ی آبرفتی، به ترتیب با شماره‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود. Γ بیانگر مرز و c و ρ به ترتیب سرعت موج برشی و چگالی هستند که برای هر محیط به طور جداگانه تعریف شده‌اند. θ زاویه‌ی موج مهاجم و n مبین بردار نرمال سطح است که براساس جهت شماره‌گذاری گره‌ها بر روی هر مرز قابل تعریف است. موج مهاجم لرزه‌ی برون‌صفحه‌ی SH از نوع موجک ریکر [۲۴، ۶۳] انتخاب و با زوایای مختلف به مسئله وارد شده است. در شکل ۲، نمودار موجک ریکر به ترتیب در حوزه‌ی زمان و بسامد مشاهده می‌شود که معادله‌ی آن مطابق رابطه‌ی ۱ [۶۳]، است.



شکل ۱. هندسه‌ی دره‌ی آبرفتی گوسی مستقر در یک نیم‌صفحه‌ی کشسان همگن در برابر امواج مهاجم SH.

که از نام آشناترین آنها، روش‌های اجزاء محدود (FEM) [۱] و تفاضل محدود (FDM) [۱] است، لازم است کل محیط مسئله مش‌بندی شود. این موضوع باعث می‌شود که مدت زمان تحلیل افزایش قابل توجه یابد و حجم حافظه‌ی اشغال‌شده‌ی رایانه مادام تحلیل شود. همچنین، به‌منظور جلوگیری از خطای تحلیل، باید دامنه در فاصله‌ی بسیار زیاد نسبت به موقعیت قرارگیری عارضه بسته و از مرزهای جاذب انرژی امواج در پیرامون آن استفاده شود. با این توصیف، برخی پژوهشگران، [۲۹-۳۲] از روش‌های حجمی بهره گرفته‌اند. سالها بعد، پژوهشگران دیگری، [۳۳، ۳۴] توانستند پاسخ لرزه‌ی سطح دره‌های آبرفتی نیم‌دایروی و نیمه‌پر را با استفاده از رویکرد ترکیبی اجزاء محدود - توسعه‌ی سری‌ها و اجزاء محدود - سری‌های لمب محاسبه کنند. اخیراً، پیرامون پاسخ لرزه‌ی دوبعدی دره‌ی آبرفتی در برابر امواج مهاجم لرزه‌ی SH از روش اجزاء محدود استفاده شده است، [۳۵، ۳۶] همچنین پژوهش‌هایی مبتنی بر روش تفاضل محدود انجام شده است. [۲۷-۴۲]

در روش‌های مرزی، بیش از نیمی از فرایند حل مسئله به صورت تحلیلی مبتنی بر استخراج حل‌های اساسی/توابع‌گرن استوار شده است. بنابراین پاسخ حاصل شده از روش‌های مرزی، دقت مطلوبی دارند. روش اجزاء مرزی (BEM) [۱] با تمرکز مش فقط بر روی مرز عارضه و اقتناع شرایط مرزی تشعشع امواج در بیکران، کاهش چشمگیر داده‌های ورودی و سهولت در مدل‌سازی را بدون توجه بر مرزهای جاذب پیرامون مدل به ارمغان آورده است. [۳۳، ۳۴] در یک دسته‌بندی کلی می‌توان روش‌های مرزی را به روش اجزاء مرزی مستقیم (DBEM) [۳] و غیرمستقیم (IBEM) [۴] تقسیم کرد. در این میان روش مستقیم با استقبال چشمگیر پژوهشگران و گسترش به مراتب بیشتر همراه بوده است. روش مستقیم قابلیت فرمول‌بندی در حالت محیط کامل [۵] و نیم‌صفحه [۶] را دارد و قادر به توسعه در حوزه‌های تبدیل‌یافته [۷] و زمان [۸] است. برای مشاهده‌ی نحوه‌ی فرمول‌بندی و مدل‌سازی در روش‌های مستقیم و همچنین تکمیل پیشینه‌ی پژوهش می‌توان به پژوهش پنجمی [۹] و همکارانش [۱۲، ۲۰]، [۲۵] استناد کرد. در میان برخی از مهمترین مطالعات انجام شده در رفتارسنجی لرزه‌ی دره‌های آبرفتی با استفاده از روش اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی بسامد می‌توان به برخی مطالعات دیگر [۲۶-۵۰]، اشاره کرد. اخیراً، پژوهش‌های دیگری [۵۱، ۵۲] پراکنش سه‌بعدی امواج لرزه‌ی بزرگ‌نمایی در موقعیت استقرار یک دره‌ی آبرفتی چندلایه را با استفاده از روش اجزاء مرزی غیرمستقیم مطالعه کرده‌اند. پی [۲۰] و همکارانش [۲۰، ۲۰] با بهره‌گیری از روش اخیر، به ارزیابی پراکنش امواج SH در حضور دره‌های آبرفتی سه‌بعدی در نیم‌فضای چندلایه پرداخته‌اند. با توسعه‌ی روش اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان توسط برخی دیگر از پژوهشگران، [۵۳-۵۶] امکان تحلیل لرزه‌ی عوارض توپوگرافی گوناگون با روش‌های اشاره شده مهیا شده است. در این راستا، پنجمی و همکارانش [۱۹، ۲۰] توانستند پاسخ لرزه‌ی برون‌صفحه‌ی دره‌های خالی متناوب نیم‌سینوسی را به کمک روش مزبور تعیین کنند. همچنین ایشان در پژوهش دیگری [۲۰، ۲۰]، [۵۸] با توسعه‌ی روش اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان برای محیط‌های ناهمگن، تحلیل لرزه‌ی دره‌های آبرفتی را در برابر امواج مهاجم SH فراهم ساخته‌اند.

مرور ادبیات فنی نشان داد که تاکنون تأثیر دره‌ی آبرفتی گوسی شکل در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین و الگوی بزرگ‌نمایی حاصل به طور جامع ارزیابی نشده است. اهمیت شکل‌گیری اینگونه دره‌ها در گذر زمان و احداث بافت‌های شهری بر روی آنها از یک سو و لزوم آیین‌نامه‌های لرزه‌ی به شناخت بهتر این قسم عوارض از سوی دیگر، موجب شد تا مؤلفان پژوهش حاضر بر تعیین الگوی بزرگ‌نمایی سطح دره‌های آبرفتی گوسی در برابر امواج مهاجم SH با استفاده از روش اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان معطوف شوند. در مطالعات پیشین، مدل‌سازی‌ها به مسائل

همه‌ی پارامترهای رابطه‌ی اخیر در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. معادله‌ی موج اسکالر حاکم بر یک محیط خطی همگن و همسان به صورت رابطه‌ی ۶ است: [۶۴]

$$\frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} + b(x, y, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2} \quad (6)$$

که در آن، $u(x, y, t)$ و $b(x, y, t)$ به ترتیب بیانگر تغییرمکان و نیروی حجمی برون صفحه در نقطه‌ی (x, y) و t معرف زمان است. سرعت موج برشی (c) از رابطه‌ی $\sqrt{\mu/\rho}$ تعیین می‌شود که در آن μ مدول برشی و ρ چگالی است. در یک محیط نیمه نامحدود دو بُعدی (نیم صفحه) لازم است شرایط مرزی مطابق رابطه‌ی ۷ تعریف شود:

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{y=0} = 0 \quad (7)$$

حل همزمان معادله‌های ۶ و ۷ منتج به تعیین توابع گرین نیم صفحه می‌شود. [۵۲]

۱.۲. معادله‌ی انتگرال مرزی (BIE)

از اعمال انتگرال باقیمانده‌های وزن دار به معادله‌ی ۶ و حذف جملات انتگرال حجمی به کمک روش‌های حل مرزی، معادله‌ی انتگرال مرزی در حوزه‌ی زمان بدون توجه به شرایط اولیه و نیروهای حجمی، مطابق رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید: [۶۶، ۶۵]

$$c(\xi)u(\xi, t) = \int_{\Gamma} \left\{ \int_0^t \left[u^*(x, t', \xi, \tau).q(x, t) - q^*(x, t', \xi, \tau) \right] d\tau \right\} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi, t) \quad (8)$$

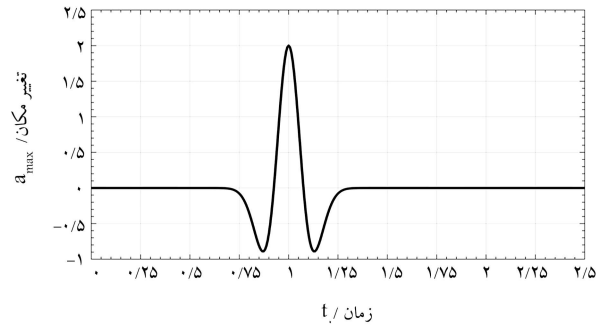
که در آن، ξ و x به ترتیب مختصات منبع و دریافت‌کننده‌ی پاسخ را نشان می‌دهند. جملات q^* و u^* و q و u انتگرال‌های کانولوشن ریمان هستند که در آنها، q^* و u^* به ترتیب معرف توابع گرین نیم صفحه در حوزه‌ی زمان برای مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن (تنش) هستند. u و q نیز به ترتیب بیانگر تغییرمکان و تنش مرزی هستند. u^{ff} تغییرمکان میدان آزاد بر روی سطح زمین صاف بدون عارضه و $c(\xi)$ زاویه‌یی شکست مرزی را تعیین می‌سازد. از حل عددی رابطه‌ی ۸، تغییرمکان در کلیه‌ی گره‌های مرزی وجه میانی دره‌ی آبرفتی قابل دستیابی است. با معرفی $c(\xi)$ برابر واحد در رابطه‌ی اخیر، امکان تعیین تغییرمکان در هر نقطه از درون دامنه (Ω) و سطح زمین ($y = 0$) فراهم است.

۳. عددی سازی

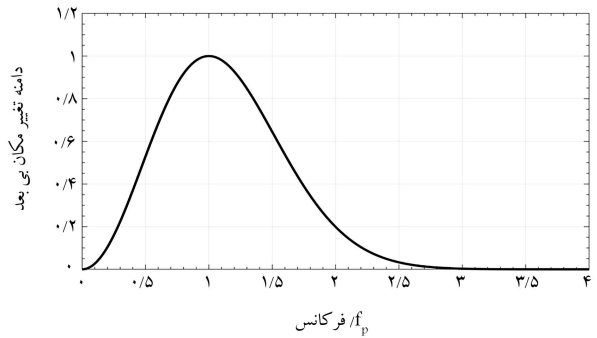
با گسسته‌سازی مرز و وجه میانی دره توسط المان‌های سه‌گره‌یی درجه‌ی دوم و اعمال انتگرال‌گیری تحلیلی و عددی به ترتیب بر محورهای زمان و مکان، فرم ماتریسی معادله انتگرال مرزی (رابطه‌ی ۸) به صورت رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$\sum_{n=1}^N H^{N-n+1} \{u^n\} = \sum_{n=1}^N G^{N-n+1} \{q^n\} + \{u^{ff.N}\} \quad (9)$$

که در آن، جملات H^{N-n+1} و G^{N-n+1} ماتریس‌هایی هستند که عناصر آن از انتگرال‌گیری مکانی هسته‌های نیم‌صفحه برای المان‌های مرزی به دست می‌آیند. بردار مقادیر مرزی در گام زمانی n برای مؤلفه‌های تغییرمکان و تنش به ترتیب با $\{u^n\}$ و $\{q^n\}$ نشان داده شده است. به منظور دستیابی به فرم قابل حل معادله‌ی



الف) حوزه زمان؛



ب) حوزه فرکانس.

شکل ۲. نمودار تابع موجک ریکر برای یک نقطه‌ی واقع در سطح صاف زمین.

$$f(t) = [1 - 2(\pi f_p(t - t_0))^2] e^{-(\pi f_p(t - t_0))^2} \quad (1)$$

که در آن، f_p بسامد غالب موج، t_0 میزان تعویق زمان و t محور حقیقی زمان است. با توجه به اینکه در مدل نیم‌صفحه باید شرایط مرزی تنش آزاد بر روی سطح زمین اقماع شود، تغییرمکان میدان آزاد (u^{ff}) را می‌توان با در نظر گرفتن فازهای ورودی و انعکاسی موج به کمک رابطه‌ی ۲ محاسبه کرد: [۴۶]

$$u^{ff}(x, y, t) = a_{max} \cdot \left(\left[1 - 2 \left(\frac{\pi f_p}{c} a^{inc} \right)^2 \right] e^{-\left(\frac{\pi f_p}{c} a^{inc} \right)^2} H \left(t - \frac{r^{ref}}{c} \right) + \left[1 - 2 \left(\frac{\pi f_p}{c} a^{ref} \right)^2 \right] e^{-\left(\frac{\pi f_p}{c} a^{ref} \right)^2} H \left(t - \frac{r^{ref}}{c} \right) \right) \quad (2)$$

که در آن، a_{max} دامنه‌ی پیشینه‌ی موجک ریکر و a^{inc} ، a^{ref} ، r^{ref} و r^{inc} استفاده از معادلات ۳ و ۴ قابل دستیابی هستند:

$$a^{inc} = c(t - t_0) + r^{inc}, \quad r^{inc} = -\sin(\theta).x + \cos(\theta).y \quad (3)$$

$$a^{ref} = c(t - t_0) + r^{ref}, \quad r^{ref} = -\sin(\theta).x - \cos(\theta).y \quad (4)$$

مطابق شکل ۱، دره‌های آبرفتی مدنظر به شکل گوسی فرض شده است که معادله‌ی آن به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$y = d \left(1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right) e^{-\tau \left(\frac{x}{b} \right)^2} \quad (5)$$

۹، با اعمال شرایط مرزی حاکم بر وجه میانی دره‌ی آبرفتی، معادله‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$[A_1]\{X^N\} = [B_1]\{Y^N\} + \{R^N\} + \{u^{ff.N}\} \quad (10)$$

که در آن، $\{X^N\}$ و $\{Y^N\}$ به ترتیب بردار مؤلفه‌های مجهول و معلوم مرزی و $[A_1]$ و $[B_1]$ به ترتیب ماتریس‌های حاوی ستون‌های متناظر با مقادیر مجهول و معلوم مرزی هستند. اثر تاریخچه‌ی زمانی دینامیکی پیشین بر گره‌ی زمانی حاضر N ام نیز با $\{R^N\}$ وارد شده است. با حل معادله‌ی ۱۰، کلیه‌ی مقادیر مجهول مرزی در هر گام زمانی به دست می‌آید و محاسبه‌ی تغییرمکان‌ها در هر نقطه‌ی درونی واقع در دامنه نیز با یک حل ثانویه امکان‌پذیر خواهد بود.

۴. مدل‌سازی

براساس فرایند زیرسازه‌سازی در حل مسائل ناهمگن به کمک روش اجزاء مرزی، دره‌ی آبرفتی گوسی‌شکل واقع بر بستر سنگی، باید از وجه مشترک جداسازی شود. لذا مطابق شکل ۱، بخش ۱ شامل یک نیم‌صفحه‌ی حاوی یک دره‌ی گوسی‌شکل توخالی در معرض امواج مهاجم لرزه‌یی و بخش ۲، نیز شامل یک محیط بسته‌ی گوسی‌شکل بوده است.

۱.۴. زیرسازه‌سازی

مطابق شکل ۱، چنانچه در بخش ۱، تمامی گره‌های وجه مشترک دره با محیط پیرامون توسط زیرنویس ۱۲ نشان داده شود، معادله‌ی انتگرال مرزی گسسته شده در گام زمانی N ام مطابق رابطه‌ی ۱۱ خواهد بود:

$$H_{12}^N u_{12}^N = G_{12}^N q_{12}^N + R_{12}^N + u_{12}^{ff.N} \quad (11)$$

که در آن، u_{12}^N و q_{12}^N به ترتیب تغییرمکان و ترکشن (تنش) در وجه مشترک (Γ_{12}) برای ناحیه‌ی شماره‌ی ۱ است. همچنین، R_{12}^N مبین تاریخچه‌ی دینامیکی پیشین در گام زمانی N ام و $u_{12}^{ff.N}$ مبین تغییرمکان میدان آزاد در وجه مشترک است. R_{12}^N از رابطه‌ی ۱۲ تعیین می‌شود:

$$R_{12}^N = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{12}^{N-n+1} q_{12}^n - H_{12}^{N-n+1} u_{12}^n) \quad (12)$$

برای بخش ۲، نیز یک محیط بسته‌ی گوسی‌شکل مدنظر است که فرم ماتریسی معادلات آن مشابه بخش ۱ است؛ با این تفاوت که فاقد تغییرمکان میدان آزاد $(u^{ff.N})$ است و جملات آن با پیروی از مسیر مش‌بندی با زیرنویس ۲۱ بیان می‌شود. [۵۸]

۲.۴. سرهم‌سازی

برای تعیین مجهولات وجه میانی، لازم است شرایط پیوستگی تساوی تغییرمکان $(u_{12}^N = u_{21}^N)$ و سازگاری تنش $(u_1 q_{12}^N = u_2 q_{21}^N)$ در مرز اشاره شده اقتناع شود. بنابراین فرم ماتریسی سرهم شده‌ی معادلات اخیر به صورت رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} H_{12}^N & -\frac{1}{\mu_1} G_{12}^N \\ H_{21}^N & -\frac{1}{\mu_2} G_{21}^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{12}^N \\ q_{12}^N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{12}^N \\ R_{21}^N \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_{12}^{ff.N} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

از حل معادله‌ی اخیر، کلیه‌ی مقادیر مجهول شامل تغییرمکان و تنش در وجه میانی حوزه‌ی آبرفتی حاصل خواهد شد. برای تعیین تغییرمکان سطح زمین کافی است معادلات مربوط به ناحیه‌ی ۱ با فرض $c(\xi)$ برابر با واحد مجدداً بازنویسی شود. لازم به ذکر است که در نوشتار پنجمی و همکارانش (۲۰۲۰)، [۵۸] فرمول‌بندی اخیر در شکل مبسوط ارائه شده است.

۵. الگوریتم داسبیم (DASBEM)

الگوریتم داسبیم مبتنی بر روش اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان است و در محیط نرم‌افزار متلب نسخه‌ی ۲۶/۹/۸ برای تحلیل گذرای مسائل اسکالر صفحه‌یی کاربرد دارد. عملکرد الگوریتم مذکور بدین شرح است که ابتدا مشخصات هندسی/مصالح مربوط به عارضه‌ی مورد مطالعه به انضمام پارامترهای معرف موج مهاجم ورودی در بخش پیش‌پردازش قرائت و سپس مدل ساخته شده وارد بخش پردازش می‌شود. پس از تحلیل مسئله و تعیین کلیه‌ی مجهولات، در نهایت خروجی در بخش پس پردازش به صورت گرافیک دو/سه‌بعدی نمایش داده می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، الگوریتم مذکور به صورت ویژه برای تحلیل عوارض آبرفتی زیرسطحی توسعه داده شده و امکان مدل‌سازی هندسه‌های دوار با تابع گوسی‌شکل بدان افزوده شده است. لازم به ذکر است که قابلیت ذکر شده با قرائت هندسه‌ی عارضه در بخش پیش پردازش الگوریتم افزایش یافته است. فلوجارت و جزئیات برنامه‌ی داسبیم در نوشتار پنجمی و همکارانش (۲۰۲۰)، [۶۷] قابل مشاهده است. همچنین، فرایند توسعه و به کارگیری الگوریتم و برنامه‌ی تهیه شده تاکنون برای امواج برون صفحه‌ی SH صورت گرفته است و مطالعات جهت اعمال امواج درون صفحه ادامه دارد.

۶. مطالعه‌ی پارامتریک

از جمله اهداف اصلی پژوهش حاضر، حساسیت‌سنجی پارامترهای کلیدی نسبت امیدانس و شکل دره‌ی گوسی بر پاسخ لرزه‌یی برون‌صفحه‌ی سطح زمین بوده است و در این راستا لازم است برخی مفاهیم پایه تعریف شوند. نتایج حاصل از تحلیل عموماً بر حسب دو پارامتر بی‌بعد ارائه می‌شود که شامل دامنه‌ی تغییرمکان نرمالایز شده و بزرگ‌نمایی است. دامنه‌ی تغییرمکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین (NDA) [۲۷] عبارت از نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییرمکان سطح زمین حاصل از تحلیل در یک بسامد معین بر دامنه‌ی فوریه‌ی حرکت ناشی از امواج مهاجم در همان بسامد است. همچنین، نسبت بزرگ‌نمایی (A) از نسبت دامنه‌ی پاسخ سطح دره‌ی آبرفتی بر تغییرمکان میدان آزاد تعیین می‌شود. نسبت شکل دره (SR) از رابطه‌ی $(SR = \frac{d}{b})$ به دست می‌آید که در آن d و b به ترتیب عمق و شعاع افقی دره هستند. نسبت امیدانس I نیز بیانگر اختلاف سختی مصالح آبرفت و بستر سنگی است که به صورت رابطه‌ی $(I = \frac{\rho_a \cdot c_a}{\rho_m \cdot c_m})$ تعریف می‌شود. در رابطه‌ی اخیر، ρ_a و c_a به ترتیب چگالی و سرعت موج برشی دره‌ی آبرفتی و ρ_m و c_m به ترتیب چگالی و سرعت موج برشی بستر سنگی هستند. در پژوهش حاضر، پاسخ حوزه‌ی بسامد در محدوده‌ی بی‌بعد (η) ۰/۲۵ تا ۵ محاسبه می‌شود. بسامد بی‌بعد (η) به کمک رابطه‌ی $(\eta = \omega b / \pi c)$ محاسبه می‌شود که در آن ω بسامد زاویه‌یی موج و c سرعت موج برشی است. عکس بسامد بی‌بعد $(T = \frac{1}{\eta} = \frac{\lambda}{\pi b})$ مبین دوره‌ی تناوب بی‌بعد است که تعبیر فیزیکی آن طول موج لرزه‌یی برابر با پهنا‌ی کل آبرفت است. در مدل تهیه شده، نسبت شکل دره (SR) به ترتیب برابر با ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و

درونی نیز در سطح زمین در نظر گرفته شد. موج مهاجم لریزی به ترتیب با زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به مدل وارد شد. در شکل ۳، تغییرمکان نرمالایز شدهی سطح زمین (NDA) در بسامدهای بی بُعد (η) ۰/۵ و ۱ برای محدودهی $-2b$ تا $2b$ از سطح زمین ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می شود، همخوانی مناسب میان نتایج حاصل از پژوهش عددی حاضر و پاسخ های تحلیلی نوشتار ونگ و همکارش (۱۹۷۴)^[۹] به چشم می خورد.

۲.۶. تحلیل در حوزهی زمان

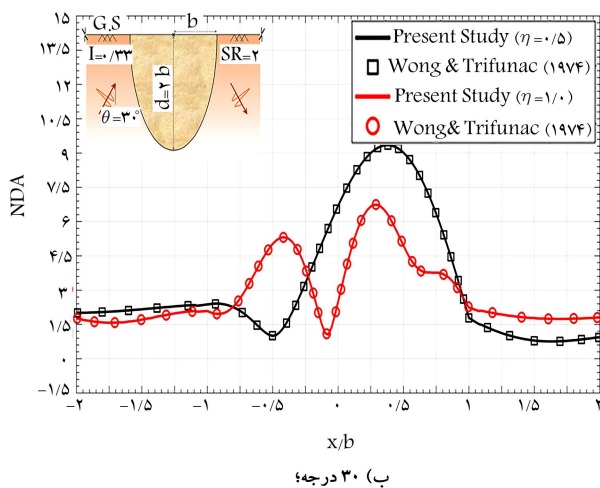
برای مشاهدهی نحوهی پراکنش گذرای امواج مهاجم برون صفحه در سطح زمین در حضور دره ی آبرفتی گوسی، شکل ۴ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در بخش کنونی، مربوط به یک دره ی گوسی شکل با نسبت شکل (SR) ۱ و امپدانس (I) ۰/۳۳ تحت زوایای تابش موج ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه است. از نتایج حوزهی زمان می توان دریافت که با ورود موج مهاجم اولیه (D) به مدل، بخشی از آن در محل برخورد به مرز دره، دچار انعکاس (R) شده است. بخش دیگر، امواجی هستند که بر روی مرز خزش یافته (C) و پس از رسیدن به سطح زمین منعکس می شوند. در این میان، بخشی از امواج انکسار می یابد و به صورت خزشی از مرز دره عبور و به درون مصالح تشکیل دهندهی آن نفوذ می کنند. اما به دلیل ماهیت نرم مصالح آبرفتی، در درون آن به دام می افتند و عملکرد آینه یی شکل مرز عارضه مانع از

۲/۰ در نظر گرفته شده و برای نسبت امپدانس مقادیر ۰/۳۳، ۰/۴۰، ۰/۵۰، ۰/۶۶ لحاظ شده است. در مطالعهی حاضر، جبهه ی امواج مهاجم لریزی برون صفحه ی SH به ترتیب با زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به مدل اعمال شده است.

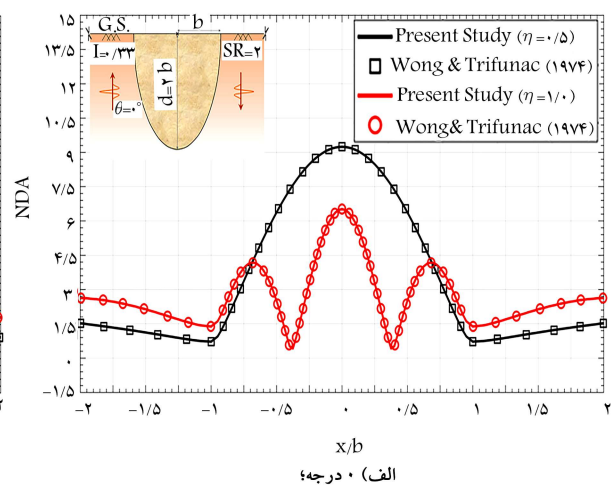
۱.۶. صحت سنجی

به منظور اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم تهیه شده (داسیم) در تحلیل دره های آبرفتی مدور تحت امواج مهاجم SH، از نتایج نوشتار ونگ^[۹] و همکارش (۱۹۷۴)^[۹] به عنوان پنج مارک استفاده شده است. ایشان از روش تحلیلی برای تعیین رفتار لریزی دره های آبرفتی نیم بیضوی منفرد استفاده کرده اند. بدین منظور، یک دره ی نیم بیضی با نسبت امپدانس ۰/۳۳ و هندسه ی مفروض مطابق با پارامترهای مقید در ادبیات فنی تهیه شده است. در مدل مذکور، سرعت موج برشی و چگالی دره ی آبرفتی به ترتیب مقادیر 400 m.s^{-1} و 0.66 ton.m^{-3} برای بستر سنگی 800 m.s^{-1} فرض شده است. بسامد غالب، میزان تعویق زمان و دامنه ی بیشینه ی موجک ریکر نیز به ترتیب مقادیر ۳ هرتز، ۱/۵ ثانیه و ۰/۱ متر منظور شده و مدل تهیه شده با ۱۰۰۰ گام زمانی ۰/۱ ثانیه تحلیل شده است.

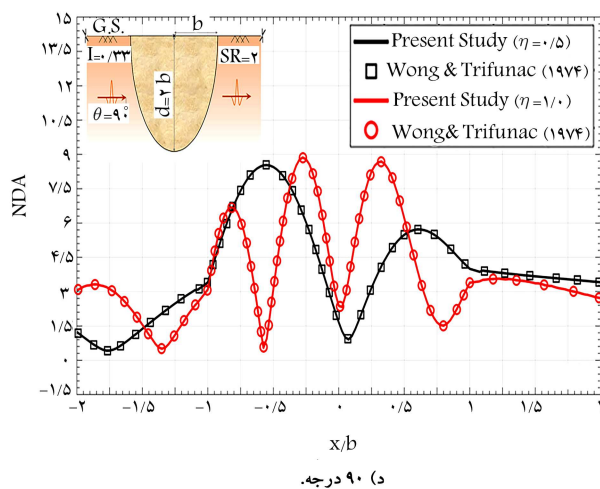
شعاع افقی دره و عمق آن به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۸۰۰ متر در نظر گرفته شده است که به یک دره با نسبت شکل ۲ (SR) منتج شده است. مرز وجه میانی دره ی آبرفتی با محیط پیرامون با ۹۷ المان درجه ی دو مش بندی و ۷۷ نقطه ی



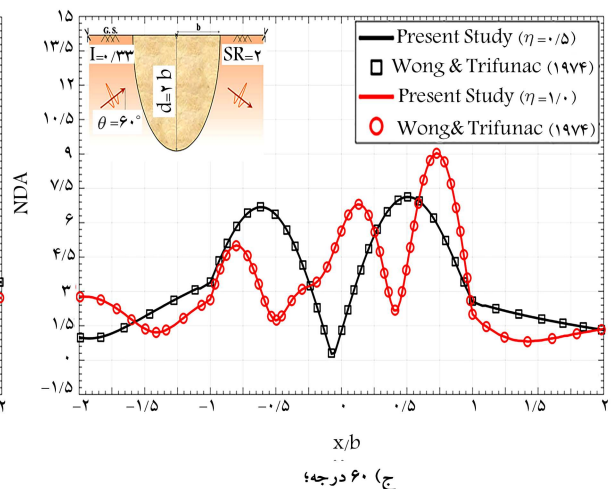
ب) ۳۰ درجه؛



الف) ۰ درجه؛

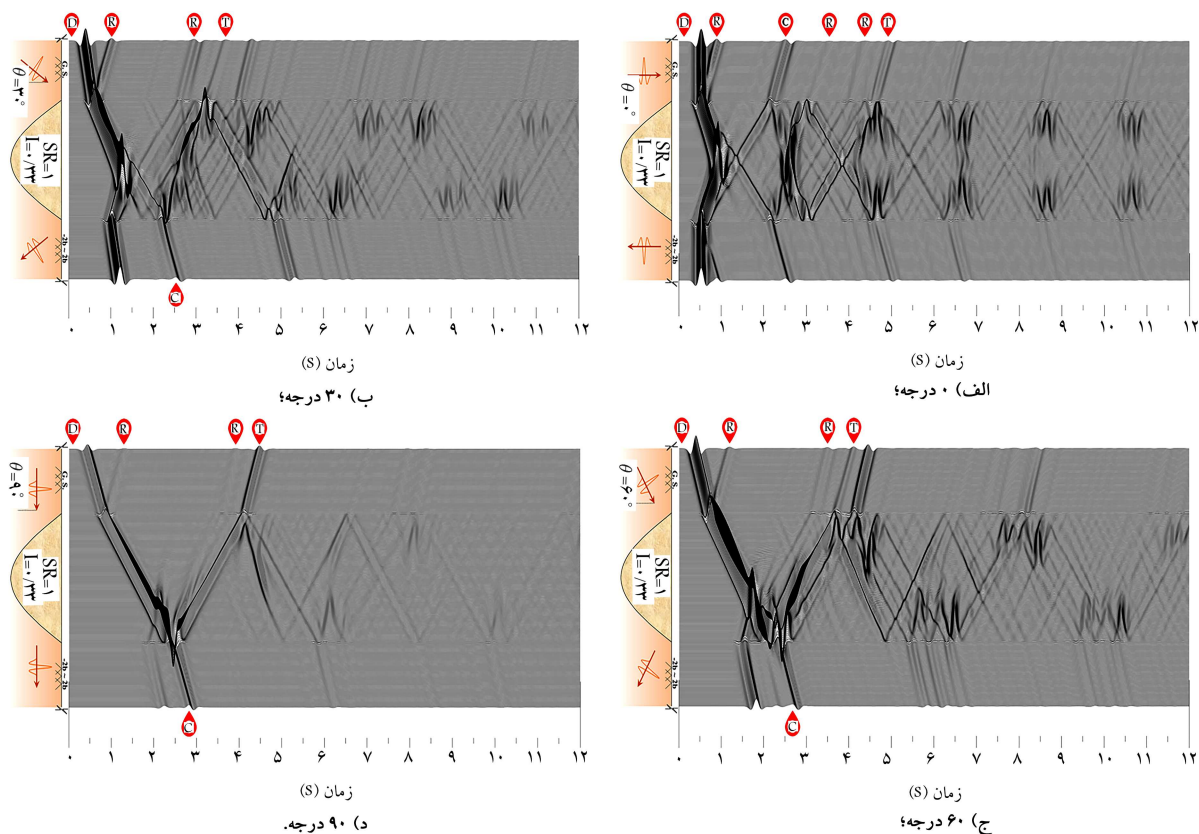


د) ۹۰ درجه.



ج) ۶۰ درجه؛

شکل ۳. دامنه ی تغییرمکان نرمالایز شدهی سطح زمین در مقابل a/b برای دره ی آبرفتی گوسی شکل در برابر امواج مهاجم SH با زاویه ی برخورد.



شکل ۴. الگوی کلی پاسخ تاریخی‌جهی زمانی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی‌گوسی با نسبت شکل (SR) $1/33$ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد.

خرزشی (C) کاهش محسوس داشته است. بدین ترتیب، هر چه زاویه‌ی جبهه‌ی موج به افق نزدیک شده است، میزان انعکاس در برابر جبهه کاهش یافته و امکان نفوذ حجم بیشتر موج در رویارویی با مرز عارضه فراهم شده است. از سوی دیگر، با توجه به هندسه‌ی منحصر به فرد و دوارگونه‌ی دره‌های گوسی‌شکل، خزش امواج نیز با سهولت بیشتر بر روی مرز آن صورت پذیرفته است. با مقایسه‌ی شکل‌های (۴ب و ۴ج) مشاهده می‌شود که میزان ارتعاش ثبت شده در پاسخ برای زاویه‌ی تابش موج 60° درجه (شکل ۴ج) بیشتر از حالت 30° درجه (شکل ۴ب) بوده است، زیرا در شکل ۴ب، حجم قابل توجهی از موج در قالب بازانعکاس به سرعت محیط مسئله را ترک کرده و امکان محصورشدگی کمتر شده است. با افقی شدن جبهه‌ی ورود موج (شکل ۴د) برخلاف حالت‌های پیشین، میزان دامنه در محل اولین انعکاس از لبه‌ی دره در سوی مخالف جبهه‌ی موج به صورت قابل توجه تقویت شده است. اما از دامنه‌ی ارتعاش در زمان‌های پس از آن به صورت چشمگیری کاسته شده است. در این حالت، دامنه‌ی امواج انعکاسی (R) بسیار ضعیف‌تر از دامنه‌ی خزشی امواج (C) بوده است.

۳.۶. تصاویر لحظه‌ی در زمان

به منظور نمایش پراکنش و تفرق امواج در زیر سطح عارضه‌ی مورد مطالعه، لازم است تصاویر لحظه‌ی در زمان‌های مناسب تهیه شود. برای دستیابی به نتایج موردنظر باید کل محیط با نقاط درونی مش‌بندی شود. در این راستا، شکل ۵ مبین تصاویر لحظه‌ی دره‌ی آبرفتی‌گوسی شکل با نسبت شکل (SR) $1/33$ و امیدانس (I) $33/0$ به ترتیب برای زوایای برخورد موج 0° ، 30° ، 60° و 90° درجه است. تعداد

خروج آسان امواج مهاجم اولیه می‌شود. در نتایج ارائه شده، اولین اثر امواج محصور شده توسط ایستگاه (T) نشان داده شده است؛ کلیه‌ی ارتعاشات به وجود آمده‌ی پس از آن ناشی از اثر امواج مهاجم مثبتی بر انعکاس و انکسار مکرر در فضای درون آبرفت است.

هنگامی که زاویه‌ی تابش موج به صورت قائم است (شکل ۴الف)، علاوه بر تقارن در پاسخ حاصل، اولین ایستگاه ثبت شده پس از ورود موج مستقیم (D)، ایستگاه امواج انعکاسی (R)، و سپس امواج خزشی (C) با دامنه‌ی کمتر است. بر این اساس می‌توان پیش‌بینی کرد، هر چه عمق دره افزایش یابد، تأخیر زمانی میان ایستگاه‌های مرزور نیز افزایش می‌یابد. با توجه به حرکت امواج خزشی بر روی مرز عارضه، امکان جذب بخشی از امواج به درون مصالح دره نیز فراهم می‌شود که با کاهش دامنه‌ی فاز خزشی مشهود است. با برخورد جبهه‌ی موج به سطح زمین، مجدداً یک فاز انعکاس پدیدار می‌شود که در نهایت به ایستگاه (T) ختم می‌شود. در این مرحله اگرچه امواج گذرای لرزه‌ی، محیط مسئله را ترک کرده‌اند، اما اثر امواج محصور شده در درون دره همچنان پایدار باقی مانده و امتداد ارتعاش با گذر زمان همراه بوده است.

با مایل شدن زاویه‌ی موج ورودی به 30° درجه (شکل ۴ب)، اثر انعکاس در وجوه مرز نزدیک به جبهه‌ی موج به ویژه در موقعیت لبه‌ی دره به خوبی نمایان است؛ اما اثر خزش موج فقط در پشت جبهه پدیدار شده است. با دنبال کردن مسیر ایستگاه T در شکل (۴ب) می‌توان دریافت محصورشدگی موج از تجمع فاز انعکاس و خزش آن پدیدار شده است؛ این در حالی است که برای زاویه‌ی تابش قائم (شکل ۴الف) فقط بازانعکاس سطح مؤثر بوده است. با افزایش زاویه‌ی جبهه‌ی موج به 60° درجه (شکل ۴ج)، دامنه‌ی امواج انعکاسی (R) در مقایسه با امواج

شکل گیرد، سازه‌های سطحی واقع بر لبه‌ی حوضه‌ی رسوبی، خسارت‌های شدیدتری را تجربه خواهند کرد.

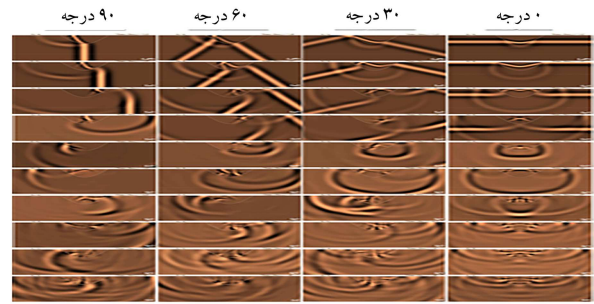
۵.۶. اثر نسبت امپدانس و شکل

شکل‌های ۷ الی ۱۰، مبین بزرگ‌نمایی سطح آبرفت در نقطه‌ی مرجع در مقابل دوره‌ی تناوب بی‌بعد هستند. نقطه‌ی مرجع مذکور بر روی سطح زمین و در مرکز دره (مرکز مختصات) تعریف شده است. نتایج به ترتیب بر حسب نسبت امپدانس $0.33/0$ ، $0.40/0$ ، $0.50/0$ ، $0.66/0$ نسبت شکل $0.5/0$ ، $1.0/0$ و $2.0/0$ زاویه‌ی تابش موج 0 ، 30 و 90 درجه ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار کمینه‌ی $0.33/0$ برای امپدانس مبتنی بر ادبیات فنی و مطابق با مطالعات پیشین اتخاذ شده است که از جمله‌ی آن می‌توان به مطالعات [۳۳، ۸۷، ۵] اشاره کرد.

چنانچه در شکل (۷الف) مشاهده می‌شود، در نسبت امپدانس $0.33/0$ ، بزرگ‌نمایی بیشینه برابر $5/5$ و در نسبت امپدانس $0.66/0$ ، بزرگ‌نمایی دستکم برابر 2 حاصل شده است. هر چه نسبت امپدانس کمتر باشد، مصالح آبرفت نرم‌تر می‌شود و امکان محصور شدن حجم بیشتر امواج در درون آن فراهم می‌آید. امواج محصور شده در برخورد با سطح زمین و مرزهای پیرامون دره به دفعات دچار انعکاس و انکسار می‌شوند که اثر آن با افزایش مقادیر بزرگ‌نمایی در سطح زمین نمایان می‌شود. در شکل (۷ب)، زاویه‌ی جبهه‌ی موج به 30 درجه مایل شده است. با توجه به انعکاس بخش غالب امواج پیش از نفوذ به درون آبرفت، مقادیر بزرگ‌نمایی در مقایسه با شکل (۷الف) به میزان $0.5/0$ واحد کاهش داشته است. در شکل‌های ج و د برای هجوم امواج مورب، کاهش محسوس بزرگ‌نمایی تا میزان $4/2$ به چشم می‌خورد. در نسبت شکل $0.5/0$ دره برابر با شکل ۷، اعمال قائم جبهه‌ی موج سبب محصورشدگی حجم زیادی از امواج در درون آبرفت می‌شود. در این حالت، باریک بودن هندسه‌ی دره به انعکاس متوالی امواج و افزایش مقادیر بزرگ‌نمایی کمک می‌کند.

با افزایش نسبت شکل دره به $1/0$ شکل ۸، میزان ارتعاش در نتایج افزایش یافته و مقادیر بزرگ‌نمایی بیشینه نیز تا حدی نسبت به شکل ۷ رشد کرده است. با افزایش تعداد دفعات انعکاس متوالی امواج، آشفستگی و اغتشاش در پاسخ افزایش و متعاقباً مدت زمان لازم برای ترک امواج به منظور ایجاد همگرایی توسعه می‌یابد. با مقایسه‌ی شکل‌های (۷د و ۷ا)، به وضوح اثر مانع‌شدگی دره در نسبت شکل بزرگتر در برابر مسیر عبور امواج لرزه‌ی مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر بزرگ‌نمایی همراه است. در نسبت شکل مساوی $1/0$ (شکل ۹)، می‌توان رشد قابل توجه بزرگ‌نمایی برای زاویه‌ی تابش 60 درجه (شکل ج) را در مقایسه با حالت‌های پیشین مشاهده کرد. اگرچه افزایش نسبت شکل دره منجر به ممانعت بیشتر عارضه در مسیر امواج گذرا می‌شود، اما هندسه‌ی عارضه نیز می‌تواند نقش قابل توجهی بر این مسئله داشته باشد.

در شکل ۹ج، برای جبهه‌ی موج 60 درجه، تجمع اثر امواج انکسار یافته و خزشی، مسبب افزایش قابل توجه بزرگ‌نمایی در پشت جبهه‌ی موج تا مقدار $5/7$ شده است. این در حالی است که در تابش افقی امواج (شکل ۹د)، میزان ارتعاش در پاسخ افزایش یافته است، اما بزرگ‌نمایی حتی از نسبت شکل $1/0$ (شکل ۹ا) نیز کمتر شده و به پایین‌تر از 5 کاهش یافته است. مقایسه‌ی نتایج به خوبی بیان می‌دارد که در نسبت شکل $2/0$ (شکل ۱۰)، بیشینه‌ی میزان لرزش و ارتعاش در نتایج حاصل شده است. از سوی دیگر، بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی در زاویه‌ی برخورد 90 درجه (شکل ۱۰د) به چشم می‌خورد. این پدیده حاکی از آن است که نه فقط هندسه‌ی عارضه، بلکه هجوم موج نیز در الگوی بزرگ‌نمایی آبرفت کاملاً مؤثر بوده است، به

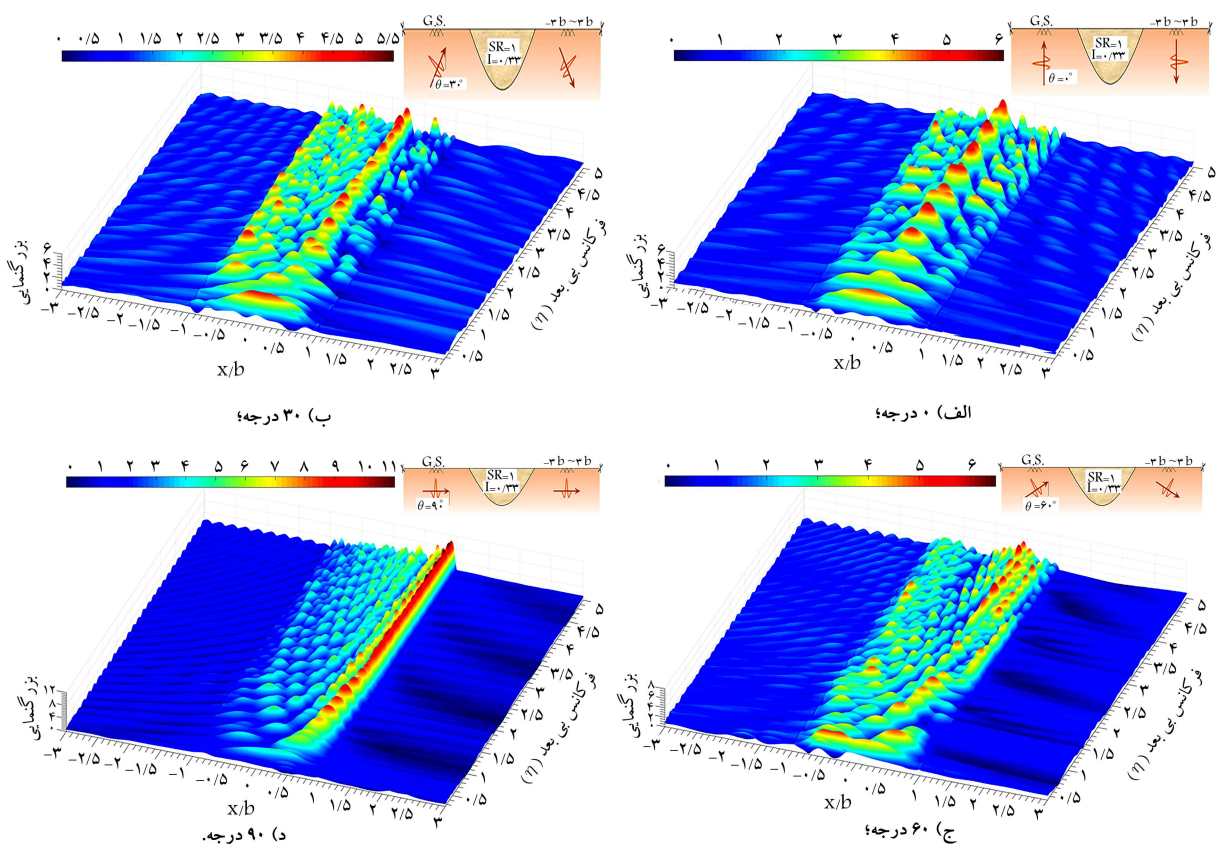


شکل ۵. الگوی پراکنش امواج مهاجم لرزه‌ی SH درون حوضه‌ی رسوبی گوسی شکل و پیرامون آن تحت زوایای برخورد مختلف و نسبت شکل (SR) $1/0$.

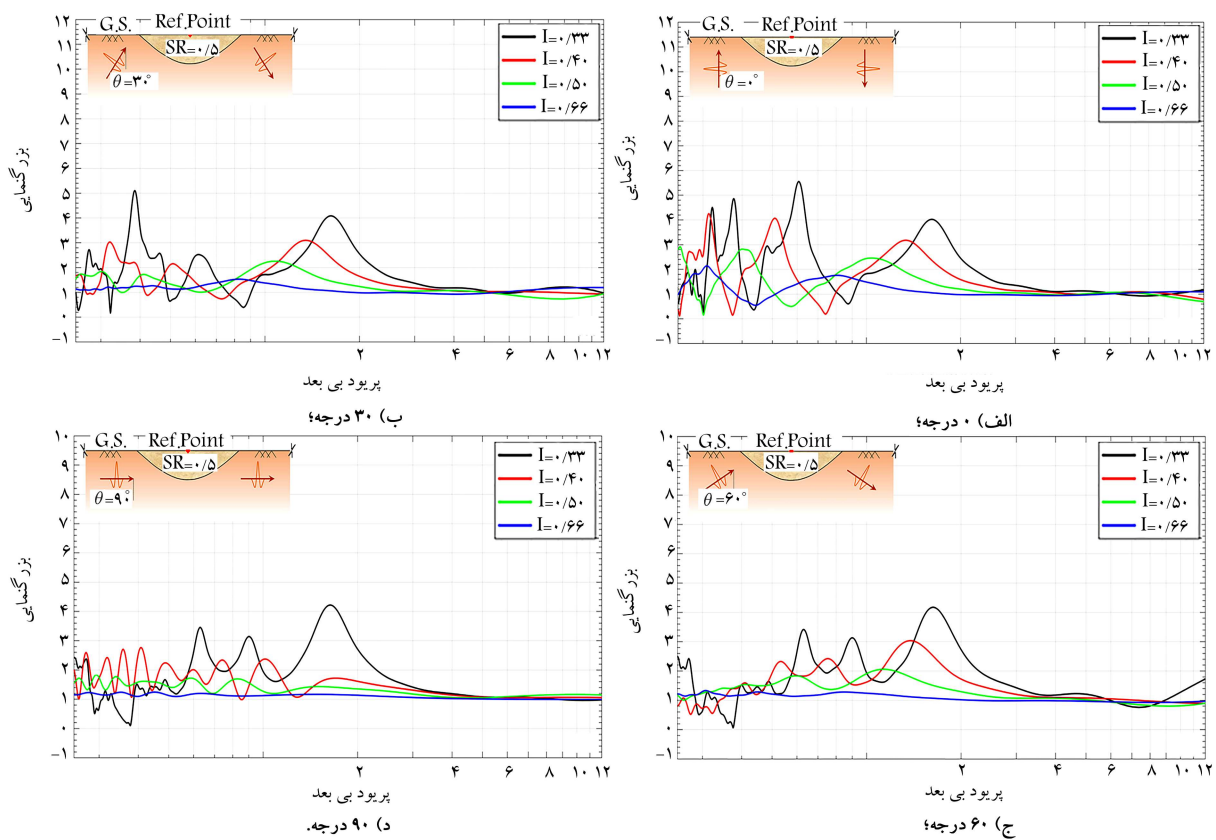
نقاط درونی در دامنه برابر با 45451 و در حوضه‌ی آبرفتی 5151 نقطه بوده است. در نتایج ارائه شده، محدوده‌ی سطح زمین بین $3b$ تا $3b$ و عمق 0 تا $3b$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مدت زمان نمایش نتایج تا ثانیه دهم از تفرق امواج بوده و تلاش شده است تا مناسب‌ترین زمان در ارائه‌ی پاسخ هر یک از مدل‌ها انتخاب شود. در شکل‌های ارائه شده به خوبی می‌توان نقش هر یک از امواج مستقیم (D)، انعکاس یافته (R)، خزش یافته (C) و محصور شده (T) را تشخیص داد. بنابراین، نمایش تصاویر لحظه‌ی به صورت مکمل در کنار پاسخ‌های حوضه‌ی زمان، می‌تواند درک بهتر نتایج و ویژگی‌های آن در حالت‌های مختلف را به ارمغان آورد.

۴.۶. تحلیل در حوضه‌ی بسامد

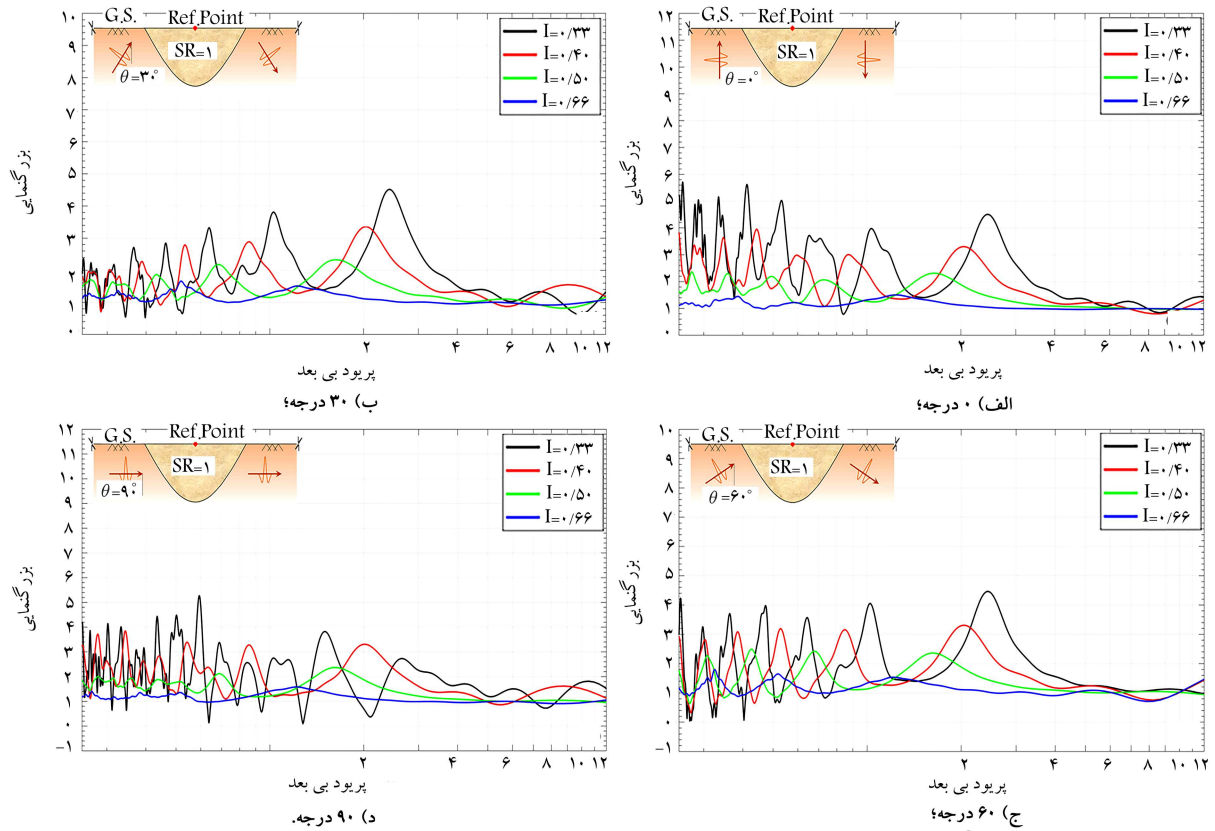
با استفاده از نتایج حوضه‌ی بسامد، میزان بزرگ‌نمایی حاصل در نقاط مختلف سطح زمین قابل مشاهده است. بدین منظور در شکل ۶، نتایج سه‌بعدی حوضه‌ی بسامد برای دره‌ی آبرفتی گوسی با نسبت شکل (SR) $1/0$ و امپدانس $0.33/0$ مشاهده می‌شود. مطابق شکل (۶الف)، با هجوم جبهه‌ی قائم موج، بیشترین بزرگ‌نمایی در مرکز دره به میزان 6 حاصل شده است. لذا نتیجه گرفته می‌شود که در هنگام برخورد قائم امواج و نفوذ به درون حوضه‌ی آبرفتی، امواج به سوی ناحیه‌ی مرکز متمایل می‌شوند و در همان موقعیت به صورت متوالی انعکاس و انکسار را تجربه می‌کنند. با توجه به نرمی لایه‌های خاک نزدیک سطح زمین و تمایل به حرکت رو به قائم امواج لرزه‌ی در مصالح آبرفتی، بیشترین میزان خطر یا آسیب به سازه‌های سطحی در مرکز حوضه‌ی آبرفتی گوسی متمرکز می‌شود. با زاویه‌دار شدن جبهه‌ی موج به 30 درجه (شکل ۶ب)، انحراف مسیر تمرکز بزرگ‌نمایی بیشینه در سوی وجه مخالف جبهه‌ی تابش مشاهده می‌شود. اما وقفه‌ی میان نقاط قله‌ی بزرگ‌نمایی به صورت محسوس نسبت به شکل (۶الف) کاهش و میزان بزرگ‌نمایی بیشینه نیز به مقدار $5/5$ نزول یافته است. با تمایل شیب جبهه‌ی موج به 60 درجه (شکل ۶ج)، تمرکز بزرگ‌نمایی با تشدید مقدار بیشینه به $6/4$ در سمت مخالف جبهه‌ی موج آشکار می‌شود. در این حالت از یک سو، اثر امواج نفوذی به درون مصالح آبرفت و از سوی دیگر، تأثیر امواج خزشی در نزدیکی لبه‌ی دره به گونه‌ی است که موجب جدایی قله‌ی بزرگ‌نمایی در ناحیه‌ی مزبور می‌شود. با هجوم افقی امواج لرزه‌ی (شکل ۶د)، تجمع امواج در لبه‌ی دره‌ی آبرفتی به صورت آشکارتر قابل ملاحظه است که افزایش بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی تا مقدار 11 را به دنبال داشته است. این مهم بیان می‌دارد، اگرچه در حالت‌های قبل نواحی مرکزی سطح دره به عنوان نواحی پرخطر برای سازه‌های سطحی تلقی می‌شد، اما شکل (۶د) نشان می‌دهد در صورتی که یک زلزله‌ی میدان نزدیک با تابش موج افقی در نزدیکی محل استقرار دره‌ی آبرفتی



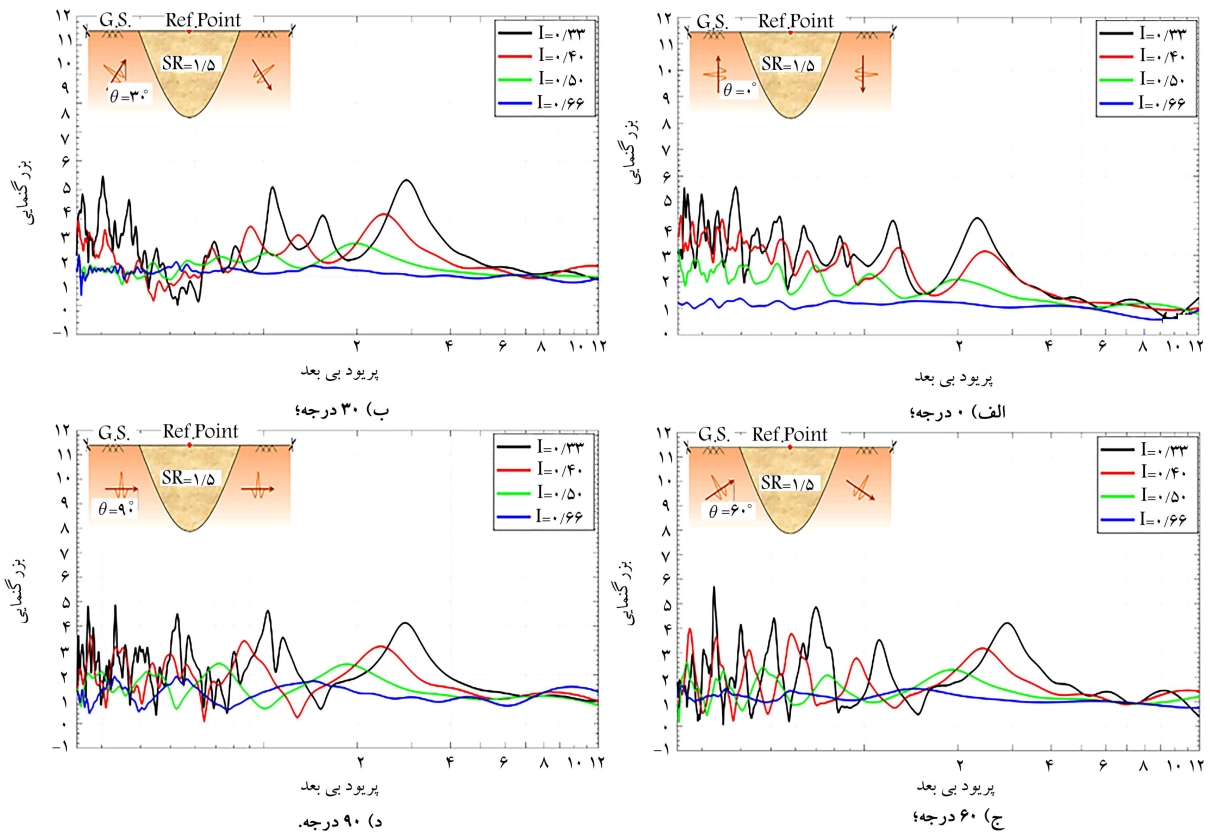
شکل ۶. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی گوسی با نسبت شکل (S/R) $1/0$ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد.



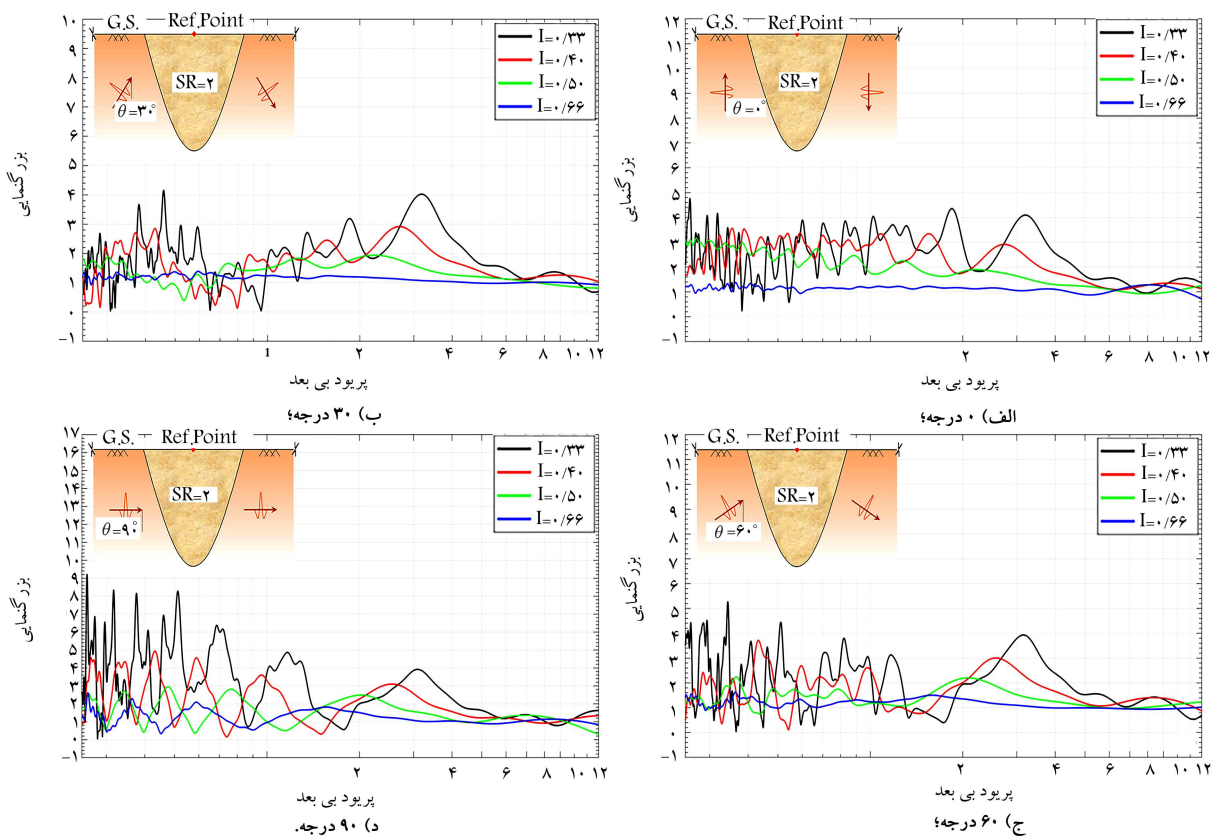
شکل ۷. تأثیر نسبت امیدانس (I) در بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی گوسی با نسبت شکل (SR) $0/5$ تحت هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد.



شکل ۸. تأثیر نسبت امیدانس (I) در بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی گوسی با نسبت شکل (SR) $1/0$ تحت هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد.



شکل ۹. تأثیر نسبت امیدانس (I) در بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی گوسی با نسبت شکل (SR) $1/5$ تحت هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد.



شکل ۱۰. تأثیر نسبت امیدانس (I) در بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی گوسی با نسبت شکل (SR) $2/0$ تحت هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد.

گرفتن تغییرات نسبت امیدانس، نسبت شکل و زاویه‌ی تابش امواج مهاجم لرزه‌ی به صورت مجزا دسته‌بندی صورت گرفته و سپس با اعمال برازش خطی بر آن، اثر هر یک از پارامترهای مزبور به خوبی رفتارسنجی شده است. با توجه به کاربرد مهندسی منحنی‌های ارائه شده در طرح‌های عملیاتی، از نتایج بخش حاضر می‌توان در راستای تکمیل و تدقیق آیین‌نامه‌ها و استانداردهای لرزه‌ی موجود استفاده کرد.

۱.۶.۶. بزرگ‌نمایی بیشینه بر حسب نسبت امیدانس

در شکل ۱۱، برازش خطی از بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی بر حسب تغییر نسبت امیدانس مشاهده می‌شود. نسبت امیدانس در بازه‌ی 0.33 تا 0.8 بوده و منحنی‌ها براساس نسبت شکل دره تفکیک شده‌اند. چنانچه در شکل (الف) مشاهده می‌شود، کلیه‌ی خطوط برازش یافته سیر نزولی دارند که نشان می‌دهد افزایش نسبت امیدانس در کاهش بزرگ‌نمایی سطح زمین مؤثر است.

در نسبت امیدانس 0.1 ، مصالح دره‌ی آبرفتی و بستر سنگی کاملاً همگن بوده و بزرگ‌نمایی در مقدار واحد ثبت یافته است. علاوه بر این، منحنی‌ها فاصله‌ی اندک نسبت به یکدیگر دارند و شیب نزولی خطوط در نسبت‌های شکل 0.5 و 0.1 تقریباً برابر است. در حالی که بیشینه‌ی شیب نزولی برای نسبت شکل 0.1 و کمینه‌ی آن در نسبت شکل 0.2 به دست آمده است. از هجوم امواج لرزه‌ی قائم می‌توان گفت که دره‌ی آبرفتی با نسبت شکل 0.5 با شیب نازل بیشینه، بیشترین بزرگ‌نمایی در امیدانس 0.33 را دارد. با مایل شدن جبهه‌ی تابش موج به 30 درجه (شکل ۱۱ ب) ملاحظه می‌شود که مقادیر بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی و روند نزولی منحنی‌ها نسبت به شکل (الف) کاهش یافته است. همچنین نسبت شکل 0.5 ، بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی را در امیدانس‌های پایین به خود اختصاص داده است. در

طوری که بیشترین میزان نسبت مذکور در برخورد افقی جبهه با دره‌ی حجیم‌تر شکل می‌گیرد. جدول ۱، بیانگر مقادیر بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی به همراه دوره‌های تناوب غالب بی‌بعد نظیر است که بر حسب نسبت شکل، امیدانس و زاویه‌ی جبهه‌ی موج طبقه‌بندی شده است.

چنانچه مشاهده می‌شود، در بیشتر حالت‌ها (به ویژه در حالت هجوم قائم موج)، بزرگ‌نمایی بیشینه در دوره‌های تناوب کمتر از واحد، رخ نمون شده است که به نوعی طول موج‌های کمتر از پهنای عارضه با محتوای بسامدی بالا مسبب رویداد اخیر است. با متمایل شدن جبهه‌ی موج به 30 درجه، میزان دوره‌ی تناوب غالب با افزایش نسبت شکل دره رشد یافته و از مقدار 2.7 نیز عبور کرده است. بنابراین، طول موج‌های فراتر از 2.5 برابر پهنای عارضه، عامل اصلی رخداد بیشترین بزرگ‌نمایی بوده‌اند. در این میان، نقش پررنگ نسبت امیدانس 0.4 در نسبت شکل‌های 0.5 و 0.2 قابل توجه است. تابش جبهه‌ی موج با زاویه‌ی 60 درجه موجب افزایش دوره‌ی تناوب بی‌بعد به ترتیب از مقدار 1.6 و 2.4 در نسبت شکل‌های 0.5 و 0.1 شده است. در حالی که برای سایر نسبت شکل‌ها، این مقدار به کمتر از 0.5 کاهش یافته است. لذا، طول موج‌های فراتر از 2 برابر پهنای عارضه در نسبت شکل‌های کوچک و طول موج‌های کوچکتر از نصف پهنای عارضه در نسبت شکل‌های بزرگ را در بروز بزرگ‌نمایی بیشینه متأثر ساخته است.

۶.۶. بزرگ‌نمایی بیشینه

در بخش کنونی به صورت منسجم به ارائه‌ی منحنی‌های بزرگ‌نمایی بیشینه‌ی سطح زمین برای حالت‌های مختلف پرداخته شده است. ابتدا، مقادیر بیشینه با در نظر

جدول ۱. بزرگ‌نمایی بیشینه‌ی سطح دره‌ی آبرفتی گوسی بر حسب دوره‌ی تناوب بی‌بعد در نقطه‌ی مرجع براساس تغییر نسبت امیدانس/شکل در برابر زوایای مختلف هجوم امواج SH.

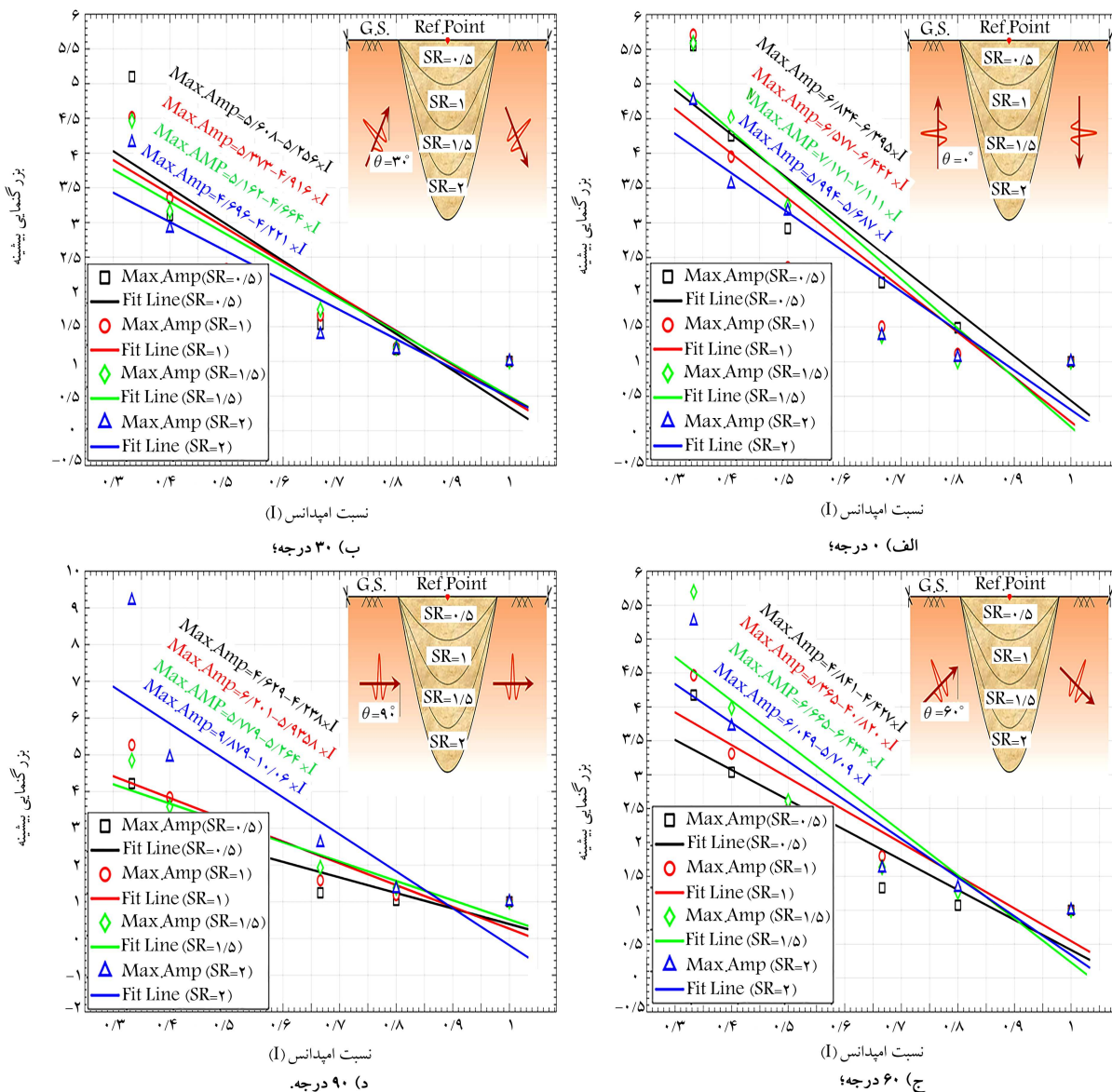
زاویه‌ی برخورد موج نسبت شکل امیدانس	درجه ۰		درجه ۳۰		درجه ۶۰		درجه ۹۰	
	دوره‌ی تناوب بزرگ‌نمایی		دوره‌ی تناوب بزرگ‌نمایی		دوره‌ی تناوب بزرگ‌نمایی		دوره‌ی تناوب بزرگ‌نمایی	
	بیشینه	غالب	بیشینه	غالب	بیشینه	غالب	بیشینه	غالب
۰٫۳۳	۰٫۶۰۶۲	۰٫۵۵۲۲	۰٫۳۸۵۲	۰٫۱۰۱۴	۰٫۶۲۲۰	۰٫۱۷۴۱	۰٫۶۴۱۹	۰٫۲۱۸۲
	۰٫۳۱۳۳	۰٫۲۵۲۳	۰٫۳۴۵۹	۰٫۰۹۹۷	۰٫۳۸۰۷	۰٫۰۳۵۹	۰٫۴۰۸۲	۰٫۲۷۶۶۷
	۰٫۲۵۳۴	۰٫۱۹۱۸۲	۰٫۰۷۶۷	۰٫۲۶۰۸	۰٫۱۲۸۵	۰٫۰۵۹۴	۰٫۲۹۴۱	۰٫۱۸۳۳۸
	۰٫۳۰۸۲	۰٫۱۳۹۳	۰٫۸۲۷۵	۰٫۵۳۳۷	۰٫۳۰۸۱	۰٫۳۳۰۵	۰٫۴۵۰۹	۰٫۲۴۳۳
۰٫۴۰	۰٫۲۵۶۷	۰٫۱۷۰۸۸	۰٫۴۱۲۹	۰٫۵۱۵۵	۰٫۴۳۷۳	۰٫۴۶۵۴	۰٫۵۹۳۴	۰٫۲۹۹۲
	۰٫۴۴۳۰	۰٫۲۹۵۲۶	۰٫۰۲۳۹	۰٫۳۵۶۱	۰٫۰۳۱۰	۰٫۳۱۰۴	۰٫۳۴۴۱	۰٫۳۸۴۳۷
	۰٫۲۷۴۹	۰٫۲۳۵۸۳	۰٫۶۳۸۴	۰٫۳۲۶۹	۰٫۴۲۶۱	۰٫۴۸۹۴	۰٫۶۱۱۱	۰٫۳۶۹۹
	۰٫۲۴۱۲	۰٫۱۵۰۴۵	۰٫۵۱۸۲	۰٫۶۶۰۹	۰٫۳۲۵۱	۰٫۷۹۹۴	۰٫۲۱۴۲	۰٫۵۸۳۲
۰٫۵۰	۰٫۲۵۰۳	۰٫۲۴۶۶	۰٫۹۸۰۵	۰٫۱۵۰۶	۰٫۲۶۷۷	۰٫۶۱۱۹	۰٫۷۱۶۸	۰٫۴۵۹۰
	۰٫۳۹۵۴	۰٫۳۶۸۰	۰٫۲۵۴۳	۰٫۱۷۴۶۱	۰٫۲۵۹۲	۰٫۶۳۳۷	۰٫۳۲۹۸	۰٫۹۲۸۵
	۰٫۲۵۸۴	۰٫۱۷۶۰۹	۰٫۴۵۸۳	۰٫۱۵۱۳	۰٫۳۴۳۵	۰٫۲۶۶۹	۰٫۲۵۹۶	۰٫۲۰۴۷
	۰٫۳۵۴۹	۰٫۳۵۵۸۵	۰٫۷۰۲۶	۰٫۹۱۷۵	۰٫۴۳۲۰	۰٫۷۱۴۷	۰٫۴۳۲۱	۰٫۹۳۳۲
۰٫۶۶	۰٫۳۶۴۵	۰٫۳۷۸۱	۰٫۵۹۴۹	۰٫۳۸۸۰	۰٫۳۶۳۱	۰٫۶۲۰۷	۰٫۲۶۱۳	۰٫۲۶۰۸۰
	۰٫۲۷۰۹	۰٫۱۶۹۰	۰٫۲۵۲۸	۰٫۹۳۸۵	۰٫۳۶۵۷	۰٫۲۴۱۶	۰٫۴۷۶۱	۰٫۹۵۰۸
	۰٫۲۷۰۹	۰٫۱۶۹۰	۰٫۲۵۲۸	۰٫۹۳۸۵	۰٫۳۶۵۷	۰٫۲۴۱۶	۰٫۴۷۶۱	۰٫۹۵۰۸
	۰٫۳۶۴۵	۰٫۳۷۸۱	۰٫۵۹۴۹	۰٫۳۸۸۰	۰٫۳۶۳۱	۰٫۶۲۰۷	۰٫۲۶۱۳	۰٫۲۶۰۸۰

شکل (۱۱ج)، که زاویه‌ی تابش جبهه‌ی موج به ۶۰ درجه متمایل شده است، در نسبت‌های امیدانس پایین، فاصله‌ی منحنی‌ها از یکدیگر زیاد هستند که اثر هندسه‌ی دره در بزرگ‌نمایی را به صورت ملموس آشکار ساخته است. با اعمال افقی جبهه‌ی موج (شکل ۱۱د) نیز ملاحظه می‌شود که منحنی مربوط به نسبت‌های شکل ۰٫۵، ۱٫۰ و ۱٫۵ به صورت متمرکز و فاصله‌ی کم نسبت به یکدیگر هستند، در حالی که در نسبت شکل ۰٫۲، فاصله‌ی زیاد و شیب نزولی قابل توجه در مقایسه با سایر حالت‌ها مشاهده می‌شود.

۲.۶.۶. بزرگ‌نمایی بیشینه بر حسب نسبت شکل

در شکل ۱۲، بزرگ‌نمایی بیشینه بر حسب تغییر نسبت شکل ارائه شده است. چنانچه در شکل (الف) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت شکل دره، مقادیر بزرگ‌نمایی در سه امیدانس ۰٫۳۳، ۰٫۴۰ و ۰٫۶۶ نزولی شده است. اما در امیدانس ۰٫۵۰،

افزایش عمق دره، رشد تدریجی بزرگ‌نمایی بیشینه را در پی داشته است. چنانچه زاویه‌ی تابش موج مهاجم لرزه‌یی به ۳۰ درجه مایل شود (شکل ۱۲ب)، به جز امیدانس ۰٫۳۳ با شیب نزولی، در سایر حالت‌ها، شیب بسیار ناچیز مشهود است. با نزدیک شدن زاویه‌ی هجوم موج به حالت افقی، همانطور که در شکل‌های (۱۲ج و د) مشاهده می‌شود، نمودارها سیر صعودی داشته و افزایش نسبت شکل با بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی همسو شده است. به علاوه، بالاترین منحنی در کلیه‌ی زوایای تابش برای امیدانس ۰٫۳۳ است که معرف نرم‌ترین مصالح برای حوزه‌ی آبرفتی است و (بالعکس). بدین ترتیب می‌توان گفت، بیشترین خطر در سطح دره زمانی است که نسبت امیدانس کمینه و نسبت شکل بیشینه باشد. آنچه مسلم است، مطابق با جدول ۱، دوره‌ی تناوب غالب در حالت مزبور میزان ۰٫۲۶ را نشان داده است که بیانگر تأثیر طول موج‌های برابر ربع پهنای دره در بروز بزرگ‌نمایی بیشینه است.



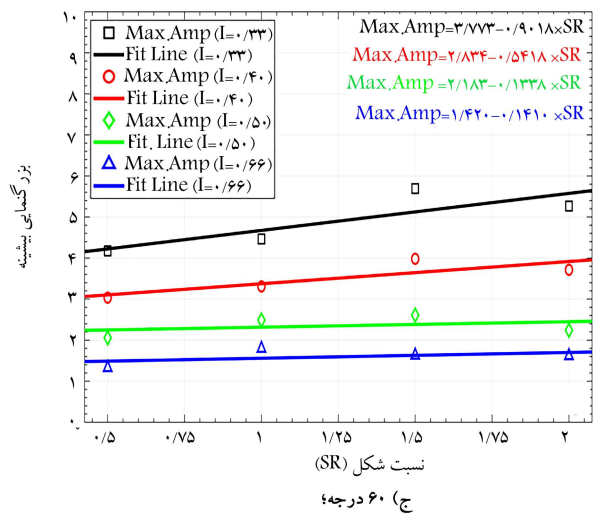
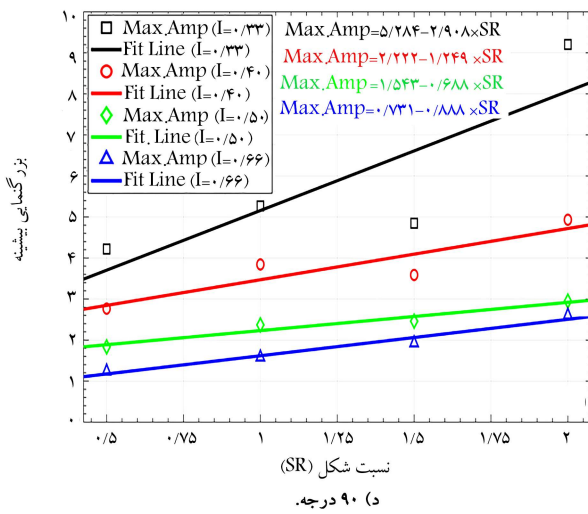
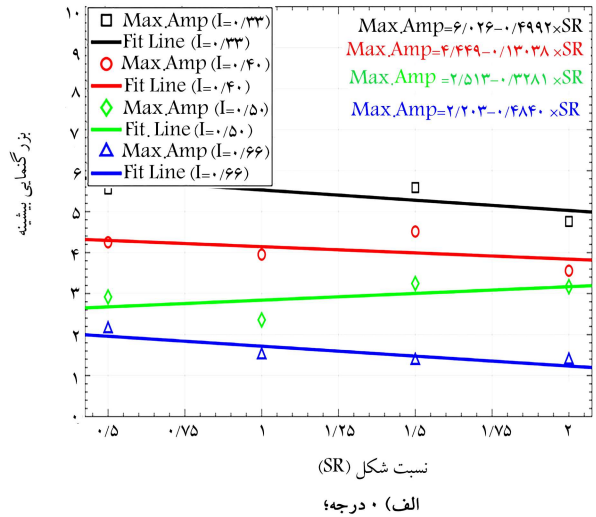
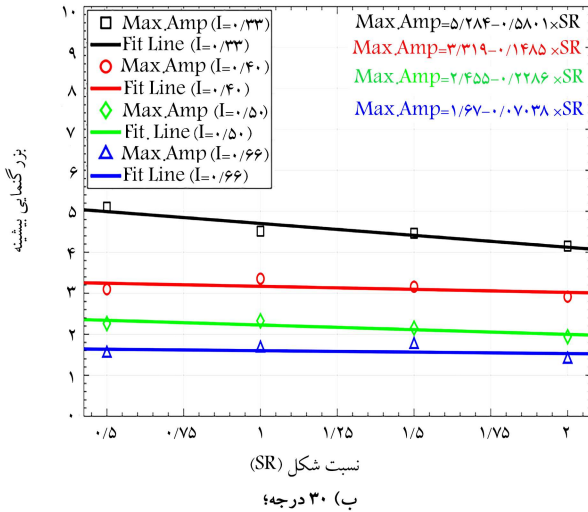
شکل ۱۱. بزرگ‌نمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع بر حسب نسبت امپدانس (I) در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد.

۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به تحلیل لرزه‌ی سطح دره‌ی آبرفتی گوسی و مجاور آن در برابر امواج مهاجم مایل SH پرداخته شده است. بدین‌منظور، از روش اجزاء مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان جهت مدل‌سازی استفاده شده است. ضمن توسعه‌ی فرمول‌بندی برای مسئله‌ی مزبور و عددی‌سازی آن در قالب الگوریتم تهیه شده (داسیم)، چند مثال صحت‌سنجی برای ارزیابی کارایی روش و دقت عملکرد الگوریتم استفاده شده تحلیل شده است. چنانچه مبین شد، روش پیشنهادی قابلیت فنی لازم برای تحلیل لرزه‌ی عوارض توپوگرافی زیرسطحی ناهمگن گوسی را دارد. پیرامون مطالعه‌ی پارامتریک، ابتدا پاسخ سطح زمین در دو حوزه‌ی زمان و بسامد ارائه و سپس تصاویر لحظه‌ی از پراکنش امواج لرزه‌ی در زیر آن نمایش داده شده است. در ادامه، با درنظر گرفتن پارامترهای کلیدی نسبت امپدانس و شکل دره‌ی گوسی، اثر حضور دره در تغییر الگوی پاسخ و

بزرگ‌نمایی سطح زمین در زوایای مختلف برخورد موج، حساسیت‌سنجی شد. درنهایت، به جمع‌بندی پاسخ‌ها در قالب یک سری منحنی‌های مهندسی اقدام شد، تا امکان استفاده از نتایج پژوهش حاضر در پروژه‌های عملیاتی فراهم آید. در اینجا به اختصار، به برخی از مهمترین دستاوردهای پژوهش حاضر اشاره شده است:

۱. بیشترین حجم محصورشدگی امواج و بزرگ‌نمایی سطح زمین به ترتیب در زوایای برخورد قائم و افقی مشاهده می‌شود. در این میان، نواحی بحرانی به ترتیب در مرکز و لبه‌ی آبرفت تحت زوایای مذکور تمرکز یافته است.
۲. ازدیاد نوسان بزرگ‌نمایی بر حسب دوره‌ی تناوب بی‌یعد با افزایش نسبت شکل دره افزایش یافته است. این موضوع در پی تکثیر انعکاس و انکسار امواج محصور در حوزه‌ی رسوبی حاصل شده است.
۳. تقویت موانع آبرفتی در پی افزایش نسبت شکل دره، به گونه‌ی منجر به



شکل ۱۲. بزرگ‌نمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت شکل (SR) در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد.

بزرگ‌نمایی در کمینه‌ی امیدانس به مقداری فراتر از ۹ افزایش یافته است.

۵. چنانچه مشاهده شده است، بیشینه‌ی خطر برای سازه‌های سطحی در نسبت امیدانس کمینه و نسبت شکل بیشینه برای لرزش‌هایی با طول موج برابر ربع پهنای حوزه‌ی رسوبی به دست آمده است.

رشد بزرگ‌نمایی در جبهه‌های برخورد نزدیک به افق شده است که به ترتیب مقادیر ۵/۷ و ۹/۲ در زاویه‌ی هجوم ۶۰ و ۹۰ درجه مبین شده است.

۴. افزایش بزرگ‌نمایی در پی کاهش نسبت امیدانس مسلم شد، به طوری که بیشینه‌ی

پانویس‌ها

1. amplification/de- amplification
2. analytical methods
3. semi-analytical methods
4. numerical methods
5. experimental methods
6. wave function expansion method
7. Chang
8. volumetric methods
9. boundary methods
10. finite element method (FEM)

11. Finite Difference Method (FDM)
12. boundary element method (BEN)
13. direct boundary element method (DBEM)
14. indirect boundary element method (IBEM)
15. full-plane BEM
16. half-plane BEM
17. transformed-domain
18. time-domain
19. Panji
20. Ba
21. dynamic analysis of structures by boundary element method (DASBEM)

22. sub-structure method
23. wave source image technique
24. Ricker Wavelet
25. Boundary Integral Equation
26. MATLABv.9/8 (2020)
27. normalized displacement amplitude (NDA)
28. shape ratio
29. Wong

(References) منابع

1. Bouchon, M. "Effect of topography on surface motion", *Bull. Seism. Soc. Am*, **63**(3), pp. 715-732 (1973).
2. Sanchez-Sesma, FJ. "Site effects on strong ground motion", *Soil Dyn Earthq Eng*, **6**(2), pp. 124-132 (1987).
3. Davis, L.L. and West, L.R. "Observed effects of topography on ground motion", *Bull. Seism. Soc. Am*, **63**(1), pp. 283-298 (1973).
4. Bard, P.Y. and Bouchon, M. "The seismic response of sediment-filled valleys, Part 2: The case of incident P and SV-waves", *Bull. Seism. Soc. Am*, **70**(5), pp. 1921-1941 (1980).
5. Manoogian, M.E. and Lee, V.W. "Antiplane deformations near arbitrary-shape alluvial valleys", *ISST J. Earthq. Tech*, **36**(2), pp. 107-120 (1999).
6. Sanchez-Sesma, FJ, Palencia, VJ, Luzon, F. and et al. "Estimation of local site effects during earthquakes: An overview", *ISST J of Earthq Tech*, **39**(3), pp. 167-193 (2002).
7. Trifunac, M.D. "Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH-waves", *Bull. Seism. Soc. Am*, **61**(6), pp. 1755-1770 (1971).
8. Trifunac, M.D. "Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon", *Earthq. Eng. Struct. Dyn*, **1**(3), pp. 267-281 (1973).
9. Wong, H.L. and Trifunac, M.D. "Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH-waves", *Bull. Seism. Soc. Am*, **64**(5), pp. 1389-1408 (1974a).
10. Wong, H.L. and Trifunac, M.D. "Scattering of plane SH-waves by a semi-elliptical canyon", *Earthq. Eng. Struct. Dyn*, **3**(2), pp. 157-169 (1974b).
11. Lee, V.W. "Three-dimensional diffraction of plane P, SV & SH-waves by a hemispherical alluvial valley", *Int. J. Soil Dyn. Earthq. Eng*, **3**(3), pp. 199-144 (1984).
12. Todorovska, M.I. and Lee, V.W. "Surface motion of shallow circular alluvial valleys for incident plane SH-waves (Analytical solution)", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **10**(4), pp. 192-200 (1991).
13. Yuan, X. and Liao, Z. "Scattering of plane SH-waves by a cylindrical alluvial valley of circular-arc cross-section", *Earthq. Eng. Struct. Dyn*, **24**(10), pp. 1303-1313 (1995).
14. Sherif, R.I. and Lee, V.W. "Diffraction around a circular alluvial valley in an elastic wedge-shaped medium due to Plane SH-waves", *Europ. Earthq. Eng*, **3**, pp. 21-28 (1996).
15. Tsaur, D.H. and Chang, K.H. "SH-waves scattering from a partially filled semi-circular alluvial valley", *Geophys. J. Int*, **173**(1), pp. 157-167 (2008).
16. Tsaur, D.H. and Chang, K.H. "Scattering of SH-waves by truncated semi-cylindrical canyon", *J. Eng. Mech, ASCE*, **135**, pp. 862-870 (2009).
17. Zhang, N., Gao, Y., Cai, Y. and et al. "Scattering of SH-waves induced by a non-symmetrical V-shaped canyon", *Geophys. J. Int*, **191**(1), pp. 243-256 (2012).
18. Chang, K.H., Tsaur, D.H. and Wang, J.H. "Scattering of SH-waves by a circular sectorial canyon", *Geophys. J. Int*, **195**, pp. 532-543 (2013).
19. Chang, K.H., Tsaur, D.H. and Wang, J.H. "Response of a shallow asymmetric V-shaped canyon to anti-plane elastic waves", *Proc. Math. Phys. Eng. Sci*, **471**(2174), 20140215 (2015).
20. Faik-Kara, H. and Trifunac, M.D. "A note on plane-wave approximation", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **51**, pp. 9-13 (2013).
21. Faik-Kara, H. and Trifunac, M.D. "Two-dimensional earthquake vibrations in sedimentary basins, SH-waves", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **63**, pp. 69-82 (2014).
22. Jalali, R.S., Tokmechi, Z. and Trifunac, M.D. "A note on the surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident-cylindrical SH-waves radiating from a fault with arbitrary orientation", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **79**(Part A), pp. 80-88 (2015).
23. Zhang, N., Gao, Y. and Pak, R.Y.S. "Soil and topographic effects on ground motion of a surficially inhomogeneous semi-cylindrical canyon under oblique incident SH-waves", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **95**, pp. 17-28 (2017).
24. Le, T., Lee, V.W. and Trifunac, M.D. "SH-waves in a moon-shaped valley", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **101**, pp. 162-175 (2017).
25. Tsaur, D.H. and Chang, K.H. "Exact solution to scattering of SH-waves by an elliptic-arc canyon in the corner of an elastic quarter space", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **110**, pp. 137-140 (2018).
26. Faik-Kara, H. "Dynamic response of an alluvial valley consists of three types of soil", *Earthq. Eng. and Eng Vib*, **19**, pp. 289-305 (2020).
27. Chang, K., Wang, W. and Hsu, S. "Antiplane response of a flat-bottomed semicircular canyon to cylindrical elastic waves", *J. Eng. Math*, **121**, pp. 125-139 (2020).
28. Sanchez-Sesma, FJ, Rosenblueth, E. "Ground motions at canyons of arbitrary shapes under incident SH-waves", *Earthq Eng Struct Dyn*, **7**, pp. 441-450 (1979).
29. Lysmer, J. and Drake, L.A., *A Finite Element Method for Seismology, Method Comp Phys*, Ed: Bolt, B.A., Academic Press, New York, 11, pp. 181-216 (1972).
30. Smith, W.D. "The application of finite element analysis to body wave propagation problems", *Geophys. J. Royal Astronom. Soc*, **42**(2), pp. 747-768 (1975).
31. Kawase, H. and Sato, T. "Simulation analysis of strong motions in the Ashigara valley considering one and two-dimensional geological structures", *J. Phys. Earth*, **40**(1), pp. 27-56 (1992).

32. Bielak, J., Xu, J. and Ghattas, O. "Earthquake ground motion and structural response in alluvial valleys", *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, **125**(5), pp. 413-423 (1999).
33. Shyu, W.S. and Teng, T.J. "Hybrid method combines transfinite interpolation with series expansion to simulate the anti-plane response of a surface irregularity", *J. Mech.*, **30**(4), pp. 349-360 (2014).
34. Shyu, W.S., Teng, T.J. and Chou, C.S. "Anti-plane response induced by an irregular alluvial valley using a hybrid method with modified transfinite interpolation", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **90**, pp. 250-264 (2016).
35. Nohegoo-Shahvari, A., Kamalian, M. and Panji, M. "Two-dimensional dynamic analysis of alluvial valleys subjected to vertically propagating incident SH-waves", *Int. J. Civ. Eng*, **17**(6), pp.823-839 (2018).
36. Nohegoo-Shahvari, A., Kamalian, M. and Panji, M. "A hybrid time-domain half-plane FE/BE approach for SH-wave scattering of alluvial sites", *Eng. Analy. BE*, **105**, pp. 194-206 (2019).
37. Frankel, A. and Vidale, J. "A Three-dimensional simulation of seismic waves in the santa clara valley, California, from a loma prieta aftershock", *Bull. Seism. Soc. Am*, **82**(5), pp. 2045-2074 (1992).
38. Moczo, P. and Bard, P.Y. "Wave diffraction, amplification and differential motion near strong lateral discontinuities", *Bull. Seism. Soc. Am*, **83**(1), pp. 85-106 (1993).
39. Zhou, H. and Chen, X.F. "A new approach to simulate scattering of SH-waves by an irregular topography", *Geophys. J. Int*, **164**(2), pp. 449-459 (2006).
40. Wang, L., Xu, Y., Xia, J. and et al. "Effect of near-surface topography on high-frequency Rayleigh-wave propagation", *J. Appl. Geophys*, **116**, pp. 93-103 (2015).
41. Zhu, C. and Thambiratnam, D. "Interaction of geometry and mechanical property of trapezoidal sedimentary basins with incident SH-waves", *Bull. Earthq. Eng*, **14**, pp. 2977-3002 (2016).
42. Zhu, C., Thambiratnam, D. and Gallage, C. "Inherent characteristics of 2D alluvial formations subjected to in-plane motion", *J. Earthq. Eng*, **23**(9), pp. 1512-1530 (2019).
43. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A. and et al. "Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid FE/BE method", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **26**(8), pp. 753-765 (2006).
44. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A. and et al. "Amplification pattern of 2D semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves", *Commun. Numer. Methods Eng*, **23**(10), pp. 871-887 (2007).
45. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J. and et al. "A literature review of seismic analysis of topographic features subjected to incident H-waves", *Bull. Earthq. Sci. Eng*, **15**, pp. 21-35 (In Persian) (2012).
46. Reinoso, E., Wrobel, L.C. and Power, H. "Preliminary results of the modeling of the Mexico City valley with a two-dimensional boundary element method for the scattering of SH-waves", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **12**(8), pp. 457-468 (1993).
47. Fishman, K.L. and Ahmad, S. "Seismic response for alluvial valleys subjected to SH, P and SV-waves", *Soil Dyn. Earthq. Eng*, **14**(4), pp. 249-258 (1995).
48. Sanchez-Sesma, FJ, Luzon, F. "Seismic response of three-dimensional alluvial valleys for incident P, S and Rayleigh-waves", *Bull Seism Soc Am*, **85**(1), pp. 269-284 (1995)
49. Ausilio, E., Conte, E. and Dente, G. "Seismic response of alluvial valleys to SH-waves", *In: Seism. Eng. Conf. AIP Conf.Proc*, 1020, pp. 199-206 (2008).
50. Ba, Z. and Yin, X. "Wave scattering of complex local site in a layered half-space by using a multidomain IBEM: Incident plane SH-waves", *Geophys. J. Int*, **205**(3), pp. 1382-1405 (2016).
51. Liu, Z.X., Liang, J.W., Huang, Y.H. and et al. "IBIEM modelling of the amplification of seismic waves by a three-dimensional layered alluvial basin", *Geophys. J. Int*, **204**(2), pp. 999-1023 (2016).
52. Liu, Z.X., Wang, D., Liang, J.W. and et al. "The fast multi-pole indirect BEM for solving high-frequency seismic wave scattering by three-dimensional superficial irregularities", *Eng. Analy. BE*, **90**, pp. 86-99 (2018).
53. Ba, Z., Wang, Y., Liang, J. and et al. "Wave scattering of plane P, SV, SH-waves by a 3D alluvial basin in a multi-layered half-space", *Bull. Seismol. Soc. Am*, **110**(2), pp. 576-595 (2020).
54. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J. and et al. "Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM", *Geophys. J. Int*, **194**(3), pp. 1849-1865 (2013a).
55. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J. and et al. "Amplification pattern of semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating incident SH-waves", *Comp. Meth. in Eng*, Isfahan, **32**(2), pp. 87-111 (In Persian) (2013b).
56. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J. and et al. "Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: A time-domain half-plane BEM", *Int. J. Civil Eng*, **12**(2 and B), pp. 160-173 (2014).
57. Panji, M. and Mojtabazadeh-Hasanlouei, S. "Transient response of irregular surface by periodically distributed semi-sine shaped valleys: Incident SH-waves", *J. of Earthq. and Tsu*, **14**(1) (2019).
58. Panji, M. and Mojtabazadeh-Hasanlouei, S. "Surface motion of alluvial valleys subjected to obliquely incident plane SH-wave propagation", *J. Earthq. Eng* (2020). doi::10.1080/13632469.2021.1927886.
59. Lubich, C. "Convolution quadrature and discretized operational calculus", *I. Numerische Mathematik*, **52**(2), pp. 129-145 (1988).
60. Garcia-Sanchez, F. and Zhang, C. "A comparative study of three BEM for transient dynamic crack analysis of 2-D anisotropic solids", *Comp. Mech*, **40**(4), pp. 753-769 (2007).
61. Manolis, G.D., Dineva, P.S., Rangelov, T.V. and et al. "Seismic wave propagation in non-homogeneous elastic media by boundary elements", *Springer: Series, Sol. Mech. Applic*, **240**, p. 294 (2017).

62. Ohtsu, M. and Uesugi, S. "Analysis of SH-wave scattering in a half space and its applications to seismic responses of geological structures", *Eng Analy*, **2**(4), pp. 198-204 (1985).
63. Ricker, N. "The form and laws of propagation of seismic wavelet", *Geophys*, **18**(1), pp. 10-40 (1953).
64. Eringen, A.C. and Suhubi, E.S., *Elastodynamics*, Academic Press (1975).
65. Brebbia, C.A. and Dominguez, J. "Boundary elements, an Introductory course", Comp. Mech. Pub., Southampton, Boston (1989).
66. Dominguez, J. "Boundary elements in dynamics", Comp. Mech. Pub., Southampton, Boston (1993).
67. Panji, M. Mojt bazadeh-Hasanlouei, S. and Yasemi, F. "A half-plane time-domain BEM for SH-wave scattering by a subsurface inclusion", *Comp. Geosci*, **134**, 104342 (2020).