

نوع مقاله: مروری

چکیده

پاسخ لرزه‌ای دره‌های آبرفتی به شدت تحت تأثیر هندسه و مشخصات مکانیکی دره و لایه‌های رسوبی داخل آن است. امواج لرزه‌ای که از منبع به سایت وارد می‌شوند، ممکن است به علت اختلاف سرعت حرکت موج در بین لایه‌های مختلف، به شدت دچار بزرگنمایی شوند. یکی از دلایل اصلی برای ارائه‌ی تحلیل‌های پاسخ ساختگاه، تفاوت در پاسخ لرزه‌ای سازه‌هایی است که با فرکانس‌های متفاوت بر روی زمین قرار دارند. مطالعات زیادی در زمینه‌ی تحلیل رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی صورت گرفته است که عمدتاً به صورت خطی یا خطی معادل بوده است و تحلیل‌های غیرخطی سهم اندکی از این پژوهش‌ها را شامل می‌شوند. در این مقاله به بررسی مطالعات عددی انجام‌شده بر روی رفتار لرزه‌ای غیرخطی دره‌های آبرفتی تحت اثر امواج مهاجم پرداخته شده است. نتایج موجود در ادبیات فنی آورده شده و اثر پارامترهای مختلف و نحوه‌ی تأثیر آنها بر روی پاسخ لرزه‌ای دره‌های آبرفتی بررسی شده است. همچنین تفاوت میان روش‌های مختلف موجود در ادبیات فنی و نتایج به دست آمده مشخص گردیده است و در نهایت به جمع‌بندی تأثیرات و میزان اهمیت هر کدام از این پارامترها پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: اثر ساختگاه، دره‌های آبرفتی، بزرگنمایی، روش‌های عددی، تحلیل غیرخطی.

مروری بر ادبیات فنی رفتار لرزه‌ای غیرخطی دره‌های آبرفتی دو بعدی

امید حیدری (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، o.heidari@iiees.ac.ir

محسن کمالیان

استاد، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

سعید سعیدی نژاد

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی، تهران، ایران

۱- مقدمه

اغلب آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای ساختمان موجود در جهان، به‌رغم آشکار شدن اهمیت اثرات ساختگاهی چند بعدی، همچنان تنها اثرات ساختگاهی یک‌بعدی را بر پارامترهای حرکت لرزه‌ای زمین مورد توجه قرار می‌دهند (ICBO, 1997, 2003; BSSC, 2003). علاوه بر آیین‌نامه‌ها، دقیق‌ترین روش‌های ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای نیز که عمدتاً بر تحلیل‌های دینامیکی یک‌بعدی آبرفت متکی هستند، امواج مهاجم را قائم و لایه‌های خاک و سطح فوقانی زمین را افقی در نظر می‌گیرند (TC4, 1993). علت اصلی عدم توجه به اثرات ساختگاهی ناشی از توپوگرافی، فقدان شناختی جامع از چگونگی این اثرات و عدم دسترسی به ابزارهای مناسب جهت تحلیل دینامیکی این عوارض، خصوصاً در فضای زمان بوده است.

خطی توسط گتمیری و همکاران (Gatmiri et al., 2003)، نجفی‌زاده و همکاران (Najafizadeh et al., 2014) و سهرابی بیدار و همکاران (Sohrabi Bidar et al., 2010) انجام شده است و تعداد پژوهش‌های محدودی در حالت غیرخطی توسط محققین برجسته‌ای انجام گرفته است. سؤالات مهمی در این زمینه مطرح می‌شود، از جمله:

۱. تفاوت پاسخ لرزه‌ای دره‌های آبرفتی با فرض رفتار غیرخطی خاک نسبت به حالت خطی چگونه است؟
 ۲. اثرات دو بعدی بودن هندسه مدل در حالت غیرخطی چه تغییراتی بر پاسخ لرزه‌ای دره ایجاد می‌کند؟
- به دلیل پیچیدگی پدیده‌ی تفرق امواج مهاجم توسط عوارض توپوگرافی، حل دقیق و کارآمد آن مستلزم استفاده از روش‌های مناسب عددی است. خاک‌ها در برابر زلزله‌های مختلف رفتارهای متفاوتی را در محدوده خطی و غیرخطی نشان

به علت پیچیدگی روش‌های تحلیل رفتار لرزه‌ای غیرخطی عوارض توپوگرافی دو بعدی عمده‌ی مطالعات بر اساس تحلیل‌های

که در آن γ_c و τ_c به ترتیب کرنش و تنش برشی در آخرین بازگشت بارگذاری سیکلی هستند. G_{max} مدول برشی تانژانتی اولیه است و H تابعی است که ارتباط بین تنش و کرنش را بیان می‌کند. فاکتور $n = 1$ برای بارگذاری اولیه اعمال می‌شود و $n = 2$ برای باربرداری و بارگذاری مجدد در نظر گرفته می‌شود. برای تشریح رفتار خاک از مدل هاردین درنویچ استفاده شده است. H بر اساس رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$H_\gamma = \frac{\gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2)$$

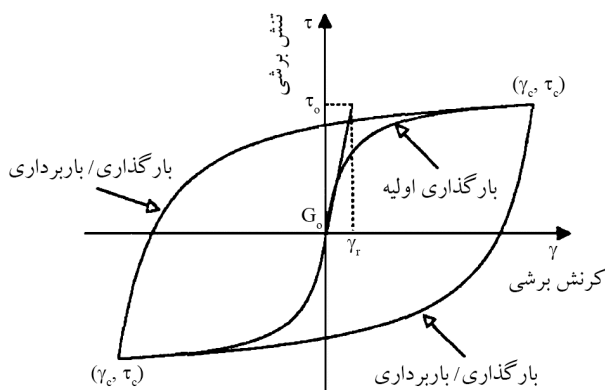
که در آن γ_r کرنشی است که از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_{max}} \quad (3)$$

تنش برشی در این مورد طبق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$\tau = \tau_c + G_{max} (\gamma - \gamma_c) \left[\frac{1}{1 + \frac{|\gamma - \gamma_c|}{n\gamma_r}} \right] \quad (4)$$

در شکل (۱) چرخه‌ی بارگذاری باربرداری در مدل هاردین درنویچ نشان داده شده است.



شکل (۱): چرخه تنش-کرنش در مدل هاردین درنویچ.

منحنی‌های اسکلتی و قانون اصلی میسینگ منجر به ایجاد چرخه در بارگذاری سیکلی شده است. تحت بارگذاری نامتعارف زلزله، معیارهای دیگری نیاز است تا رفتارهای پیچیده تشریح شود. تاکمیا و ایشیاما (۱۹۹۳) روند محاسبات را برای

می‌دهند. در صورت ایجاد زلزله با بزرگای کوچک یا بزرگ، رفتار خاک تغییر خواهد کرد و به طبع آن تحلیل عددی استفاده شده در این موارد نیز متفاوت خواهد بود. با توجه به اینکه در محدوده زلزله‌های بزرگ با کرنش‌های بالا، رفتار خاک غیرخطی می‌شود پاسخ لرزه‌ای دره‌های آبرفتی در این حالت اهمیت پیدا می‌کند. جوینر و چن (Joyner & Chen, 1975) از جمله اولین محققینی بودند که با استفاده از مدل رئولوژیک ایوان (Iwan, 1976)، در زمینه‌ی تحلیل رفتار لرزه‌ای غیرخطی عوارض توپوگرافی دو بعدی پیشگام بودند.

در ادامه، محققین روش‌های عددی مختلفی را جهت بررسی دقیق‌ترین پاسخ‌ها مورد استفاده قرار داده‌اند که در زیر به موارد مهمی از این روش‌ها اشاره شده است. مهم‌ترین روش‌های استفاده شده عبارتند از روش هیبرید، تفاضل محدود، المان محدود، المان محدود طیفی که در ادامه به تعدادی از این مطالعات می‌پردازیم.

۲- مطالعات انجام‌شده با روش هیبرید

۲-۱- تاکمیا و آدام (Takemiya & Adam, 1998)

در سال ۱۹۹۵ زلزله شدیدی در دره هیوگوکن نانبو در شهر کوبه رخ داد و باعث ایجاد تخریب شدیدی در این منطقه شد. در این تحقیق تمرکز بر روی ویژگی‌های زمین‌شناختی برش شمالی جنوبی شهر کوبه است. شبیه‌سازی به صورت دو بعدی درون صفحه با اعمال موج P و SV انجام شده است و مدل‌سازی و تحلیل‌ها با استفاده از روش هیبرید (FEM-BEM) انجام گرفته است. برنامه‌ای که توسط نویسنده توسعه یافته توانایی شبیه‌سازی مربوط به مسائل پاسخ لرزه‌ای غیرخطی در حالت دو بعدی را داراست. نمونه‌ی مورد بررسی، رفتار غیرخطی آبرفت کوبه است که تحت تأثیر تحریک JMA قرار گرفته است. مدل رفتاری غیرخطی به کار رفته مدل اصلاح‌شده هاردین درنویچ است و برای انتقال امواج از روش نیوتون رافسون استفاده شده است.

رابطه‌ی تنش-کرنش در این مدل از رابطه‌ی (۱) تبعیت

می‌کند:

$$\tau = \tau_c + G_{max} (\gamma - \gamma_c) \left[1 - H\left(\frac{1}{n} |\gamma - \gamma_c|\right) \right] \quad (1)$$

سختی برای محدوده‌ی المان محدود و K_{BB} سختی برای المان مرزی است. ضرایب به کار گرفته شده برای انتگرال‌گیری عددی عبارت است از $\alpha = 2/1$ ، $\beta = 4/1$ و $\gamma = 1/2$ برای استفاده از یک تابع وزن‌دهی متقارن خطی در مبدأ در نظر گرفته شده است. با فرض حل افزایشی تا مرحله زمانی $K + (i-1)/N$ می‌توان رابطه (۶) را برای گام زمانی بعدی $K + i/N$ حل کرد. رکورد دانشگاه کوبه (KBU) که بر روی یک خاک سفت واقع شده است دارای دوره تناوب غالب بیشتر از ۱ ثانیه است و نزدیک گسل است؛ اما رکورد (JMA) که بر روی آبرفت واقع شده کمتر از ۱ ثانیه است. برای بررسی دقیق‌تر از موج ریکر با دامنه و دوره تناوبی متفاوت استفاده شده است و به صورت تغییر مکان اعمال شده است. موج ریکر با دوره تناوب غالب پایین شبیه‌ساز رکورد JMA است و موج ریکر با دوره تناوب غالب بالا شبیه‌ساز رکورد کوبه است.

نتایج تحلیل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱. محتوای فرکانسی پاسخ شتاب را در حالت غیرخطی و خطی معادل در نقاط مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مناطق ساحلی دامنه‌ی پاسخ در دوره تناوب‌های پایین (کمتر از ۱ ثانیه) به دلیل رفتار غیرخطی مصالح به شدت کاهش می‌یابد اما در دوره تناوب‌های بالا این تفاوت اندک است. در سایر نقاط دامنه و دوره تناوب غالب در حالت خطی معادل و غیرخطی تفاوت اندکی دارند.
۲. اثرات غیرخطی در مناطق ساحلی باعث کاهش بزرگنمایی و افزایش دوره تناوب می‌شود.
۳. بیشترین اثرات غیرخطی و به تبع آن افزایش میرایی هیستریک در مناطق ساحلی رخ داده است (در مناطق ساحلی میرایی از ۵ درصد در کرنش‌های پایین (10^{-4}) تا ۲۵ درصد در کرنش‌های بالا (10^{-2}) تغییر می‌کند. برای سایر مناطق این نسبت بین ۳ درصد در کرنش‌های پایین و ۱۰ درصد در کرنش‌های بالا تغییر می‌کند.
۴. نتیجه می‌شود تحریک با دوره تناوب غالب پایین خیلی بیشتر از تحریک با دوره تناوب غالب بالا تقویت می‌شود.

اعمال این قوانین با جزئیات بیان کردند. روش المان محدود برای مدل‌سازی قسمت‌های داخلی و مرکزی دره با در نظر گرفتن المان‌های چهارضلعی کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. از روش المان مرزی برای مدل کردن قسمت‌های کناری مدل، با در نظر گرفتن المان‌هایی با هندسه خطی که جابه‌جایی و کشش آنها ثابت فرض شده است. گام‌های زمانی المان مرزی (Δt) به N تعداد گام زمانی مساوی (Δt_f) برای روش المان محدود تقسیم شده‌اند. ترکیب المان محدود و المان مرزی در گام زمانی Δt انجام گرفته است در حالی که معادلات حاکم برای گام‌های زمانی Δt_f حل شده است. معادلات المان محدود و المان مرزی فرموله شده‌اند که گره‌های اتصال و سایر گره‌ها به ترتیب با اندیس‌های I و O نشان داده می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} KF_{OO} & KF_{OI} \\ KF_{IO} & KF_{II} + \Delta t_f^2 \alpha K_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_O \\ u_I \end{Bmatrix}^{K+\frac{i}{N}} = \Delta t_f^2 X \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ RB \end{Bmatrix}^{K+\frac{i}{N}} - \begin{Bmatrix} 0 \\ RB \end{Bmatrix}^{K+\frac{i-1}{N}} + \begin{Bmatrix} RF_O \\ RF_I \end{Bmatrix}^{K+\frac{i-1}{N}} + \begin{Bmatrix} RF_O \\ RF_I \end{Bmatrix}^{K+\frac{i-2}{N}}$$

بالانویس K بیانگرهای گام‌های المان مرزی و i بیانگر گام‌های المان محدود است. ماتریس‌های مربوطه بدون پارتیشن‌بندی عبارتند از:

$$\begin{aligned} [KF] + [M_F + \gamma \Delta t_f C_F + \beta \Delta t_f^2 K_F] \\ \{RB\}^{K+\frac{i}{N}} &= \alpha F_{BB}^{K+\frac{i}{N}} + (1-\alpha) F_{BB}^{K+\frac{i-1}{N}} \\ \{RB\}^{K+\frac{i}{N}} &= (1-\alpha) K_{BB} u_I^{K+\frac{i-1}{N}} \\ \{RF\}^{K+\frac{i-1}{N}} &= \\ [2M_F - (1-2\gamma)\Delta t_f C_F + (2\beta - \gamma + \frac{1}{2})\Delta t_f^2 K_F] U^{K+\frac{i-1}{N}} \\ \{RF\}^{K+\frac{i-2}{N}} &= \\ [-M_F + (1-\gamma)\Delta t_f C_F + (-\beta + \gamma - \frac{1}{2})\Delta t_f^2 K_F] U^{K+\frac{i-2}{N}} \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن C_F ، M_F و K_F به ترتیب ماتریس‌های جرمی، میرایی و

۲-۲-۲- کمالیان و همکاران

در سال ۲۰۰۲ گتمیری و کامالیان (Gatmiri & Kamalian, 2002) با ترکیب دو روش اجزای محدود و اجزای مرزی، نشان دادند که می توان در فضای زمان، محیط های خشک یا اشباع ارتجاعی و ارتجاعی خمیری را تحت شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی تحلیل کرد. نویسندگان این تحقیق با تولید نرم افزاری تحت عنوان HYBRID به حل مسائل غیرخطی دو بعدی در محیط های خشک یا اشباع تحت شرایط بارگذاری دینامیکی در فضای زمان پرداختند. نرم افزار تولید شده با حل یک مثال موردی که انفجار زیرزمینی بود به مطالعه حساسیت سنجی بر روی پارامترهای مکانیکی و هندسی ساختگاه قرار گرفت.

موارد بررسی شده در این تحقیق عبارتند از:

- (الف) اثر نفوذپذیری محیط اشباع فوقانی بر پاسخ دینامیکی سطح
 (ب) اثر مدول خمیری محیط ارتجاعی خمیری فوقانی بر پاسخ دینامیکی سطح
 (پ) اثر شدت بار بر پاسخ دینامیکی محیط ارتجاعی خمیری فوقانی

۱. با افزایش نفوذپذیری، پاسخ دینامیکی سطح زمین به پاسخ دینامیکی محیط خشک میل می کند.

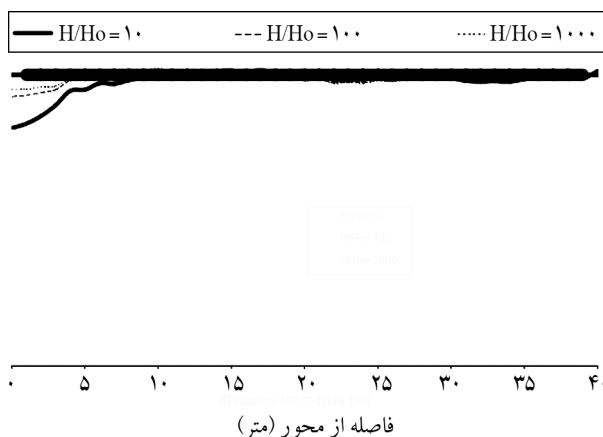
۲. با کاهش نفوذپذیری، حداکثر دامنه جابه جایی کاهش می یابد که نشان دهنده آن است که آب حفره ای همانند یک جاذب انرژی عمل می کند.

برای بررسی مدول خمیری فرض شده که لایه بالایی، مصالحی با رفتار الاستو-پلاستیک که چند سطح گسیختگی دارد و مشخصات الاستیک و پلاستیک مصالح همانند مثال پریو (۱۹۸۵) فرض شده است.

شکل (۳) نشان دهنده پروفیل تغییر مکان های قائم سطح زمین است که حاصل یک بارگذاری انفجاری در لحظه $t = 0.2$ ثانیه و به ازای مدول های پلاستیک مختلف است و بیانگر این است که:

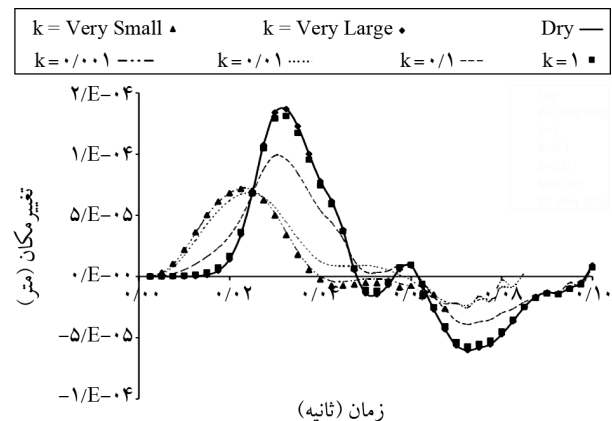
۱. با افزایش مدول پلاستیک، از مقادیر تغییر مکان های ماندگار کاسته شده است.

۲. با افزایش فاصله از کانون انفجار، پروفیل به دست آمده به ازای مدول های پلاستیک مختلف به یکدیگر نزدیک شده است. این به معنای آن است که با افزایش فاصله از کانون انفجار، رفتار محیط به سمت رفتار ارتجاعی میل پیدا می کند.



شکل (۳): جابه جایی های ماندگار پروفیل سطح زمین به ازای مدول های خمیری مختلف.

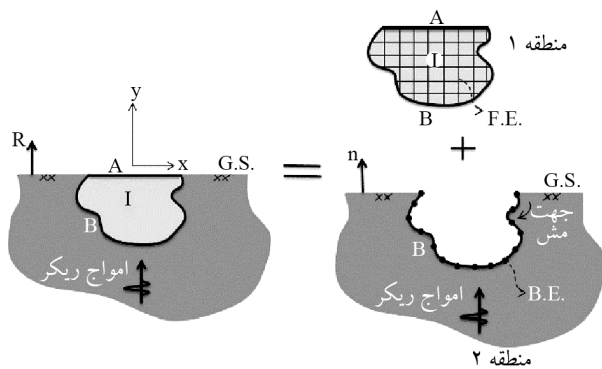
برای بررسی اثر شدت بار بر پاسخ دینامیکی محیط ارتجاعی خمیری فوقانی، شدت بارهای 0.1 ، 1 ، 5 و 2 در نظر گرفته شده که نتایج حاصل بیانگر این است که:



شکل (۲): پاسخ های دینامیکی نقطه A به ازای سختی های مختلف.

نتایج حاصل از تحقیق به شرح زیر است:

برای بررسی تأثیر نفوذپذیری مقادیر متفاوتی از نفوذپذیری در نظر گرفته شده است که مقدار این ضریب برای لایه پایینی ۹ برابر لایه اشباع بالایی می باشد که با توجه به نمودار شکل (۲) مشخص است که:



شکل (۴): طرح شماتیک ناحیه محدود اجزای محدود و ناحیه نامحدود اجزای مرزی.

مدل شده و مدل‌سازی ساده‌تر می‌شود و می‌توان این ویژگی را از مزایای این روش دانست. علاوه بر این هر دو روش برای ترکیب معادلات حاکم مناسبند و معادلات حاکم روش اجزای مرزی به معادلات حاکم روش اجزای محدود تبدیل می‌شود. در ادامه معادلات در چارچوب اجزای محدود حل می‌شود و مجهولات محاسبه می‌شود.

در گام بعدی با حل مثال‌های یک‌بعدی و دو بعدی با هندسه مستطیلی و نیم‌دایره‌ای دقت و کارایی نرم‌افزار داس فیم با ادبیات فنی به خوبی بررسی شد. روش ارائه شده می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد برای تحلیل غیرخطی پاسخ دره‌های آبرفتی استفاده شود که از مزایای آن می‌توان به کاهش المان‌های مرزی، مدت‌زمان تحلیل و خطاهای ناشی از انتشار امواج پرداخت.

۳- مطالعات انجام‌شده با روش تفاضل محدود

۳-۱- تیلور و لارکین (Taylor & Larkin, 1978)

در این تحقیق اثرات تغییر در خصوصیات هندسی و مصالح را مورد بررسی قرار داده‌اند. تیلور و لارکین در این مطالعه با استفاده از روش عددی تفاضل محدود صریح در برنامه استفاده از روش رفتار لرزه‌ای مدل پرداختند. مدل رفتاری به کار گرفته شده جهت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک همان مدل کلاسیک ایوان (Iwan, 1976) بوده است که جوینر و چن (Joyner & Chen, 1975) اصلاحات مربوط به دو بعدی بودن

۱. رفتار آبرفت در لحظات اول ارتجاعی، به همین دلیل منحنی‌های پاسخ دینامیکی بر هم منطبق است.

۲. با افزایش شدت بار، رفتار خاک غیرخطی‌تر و تغییر شکل‌های پسماند افزایش می‌یابد.

در ادامه تحقیق قبلی کمالیان و همکاران در سال ۲۰۰۶ (Kamalian et al., 2006) با ارائه فرمول‌بندی پیشرفته حاصل از ترکیب روش المان محدود و روش اجزای مرزی در حوزه زمان، به حل مسائل انتشار امواج و بررسی پاسخ ساختگاه‌های غیر همگن دو بعدی که تحت اثر امواج مهاجم P و SV هستند، پرداختند. این الگوریتم که به طور کامل در فضای زمان تهیه شده است، می‌تواند چارچوب مناسبی جهت گسترش مطالعات آینده در زمینه تحلیل غیرخطی اثرات ساختگاه در حالت دو بعدی گردد. نتایج عددی بیانگر این است که گام‌های زمانی در روش هیبرید نسبت به روش اجزای مرزی برای رسیدن به نتایجی با دقت مشابه حداقل دو مرتبه کوچک‌تر است.

همچنین نتایج بیانگر این است که در مواردی که ناهمگونی سطح با نسبت عمق به نصف عرض دره بیشتر از ۱ باشد، اثرات ساختگاه قابل توجه است.

با ارائه کامل فرمول‌بندی هیبرید پیشرفته (روش اجزای محدود و اجزای مرزی نیم‌صفحه) در حوزه زمان که منجر به تولید نرم‌افزاری تحت عنوان داس فیم شد در سال ۲۰۱۹، نوحه‌گو-شاهواری و همکاران (Nohegoo-Shahvari et al., 2019) به تحلیل عوارض توپوگرافی با هندسه‌های دلخواه تحت امواج مهاجم SH پرداختند. در این روش ویژگی‌های توپوگرافی به دو بخش محدود و نامحدود تقسیم شده است. بخش محدود شده که شامل مصالح آبرفتی می‌باشد با روش اجزای محدود مرسوم که روشی مناسب برای مدل‌سازی محیط‌های محدود است مدل شده است. بخش نامحدود که شامل ویژگی‌های شکل دره در فضای نیمه‌بی‌نهایت است با استفاده از روش مرزی نیم‌صفحه مدل شده است (شکل ۴).

با توجه به اینکه در روش مرزی نیم‌صفحه فقط بخش خط اتصال دره نیاز به مش‌بندی دارد، بنابراین باعث کاهش المان‌ها

۱. اثرات غیرخطی تأثیرات زیادی بر امواج سطحی خواهند گذاشت. مخصوصاً در زلزله‌های قوی‌تر که این اثرات بسیار چشمگیر است. این زلزله‌ها تحریکاتی با دامنه زیاد در فرکانس‌های پایین ایجاد می‌کند که بر روی سازه‌های منعطف تأثیر بیشتری می‌گذراند.

۲. میرایی هیسترتیک وابسته به کرنش در مدل‌های غیرخطی باعث کاهش بیشتر پاسخ ناشی از تحریک زلزله با بزرگای بالا می‌شود (این نتیجه از مقایسه‌ی نسبت بزرگای سرعت روی سطح به سنگ‌بستر نتیجه می‌شود که این مقدار در حالتی که بزرگای زلزله کوچک‌تر است مقدار بیشتری دارد).

۳. زلزله‌های با بزرگای بیشتر، پاسخ سطحی بزرگ‌تری را در فرکانس‌های پایین ارائه می‌دهند.

۳-۲- ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2009)

در این تحقیق به بررسی اثرات هندسه بر پاسخ غیرخطی دره‌های آبرفتی دو بعدی پرداخته شده است که به این منظور از سه مدل دره با نسبت عرض به عمق ۱۰، ۶، ۳ = w/H استفاده شده است. این سه دره تحت اثر امواج ورودی با بزرگای متفاوت و فاصله از منبع مختلف قرار گرفتند. طیف پاسخ نسبت بزرگنمایی در چهار نقطه رو سطح دره محاسبه شده است و میانگین تغییر نسبت بزرگنمایی در برابر طیف‌های تحریک ورودی، برای PGA و سه پرئود طیفی ۰/۲، ۰/۵ و ۱ ثانیه برآورد شده است. به همین ترتیب میانگین طیف پاسخ نسبت بزرگنمایی برای دو مدل غیرخطی یک‌بعدی نیز محاسبه شده است.

بر اساس ارتباط بین نسبت بزرگنمایی میانگین و طیف‌های تحریک نقاط تقاطع به دست آمده است. این نقاط مقادیر تحریکی است که محدوده‌ی بزرگنمایی را از محدوده کوچک‌نمایی جدا می‌کند. این نقاط از محل برخورد نمودار تابع پاسخ سطحی زمین نسبت به PGA موج ورودی و یک خط راست با شیب ۴۵ درجه به دست می‌آید (شکل ۵) (Liam Finn & Lei, 1996; Idriss, 1990).

را در آن انجام داده است. بعد از آن تیلور و لارکین (Taylor & Larkin, 1978) غیرخطی بودن را در آن لحاظ کردند و در تحقیق خود این مدل استفاده کردند.

فرمولاسیون مدل رفتاری استفاده شده در ادامه توضیح داده می‌شود:

تحلیل‌ها با در نظر گرفتن تنش کل و به‌کارگیری تنش میانگین (σ_m) و تنش انحرافی (σ_{ij}) مطابق تعاریف زیر انجام شده است.

$$\begin{aligned} \sigma_m &= S_{kk} / 3 \\ \sigma_{ij} &= S_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \end{aligned} \quad (7)$$

در این مدل از تعدادی سطح تسلیم در فضای تنش استفاده شده است که از معیارهای تسلیم فون‌مایسز پیروی می‌کنند:

$$F_n = (\sigma_{ij} - \alpha_{nij}) = k_n^2 \quad (8)$$

سخت‌شوندگی کینماتیک از نوع پراگر به‌طوری به کار گرفته شده است که هر سطح تسلیم در فضا تغییر مکان می‌دهد و به نقطه‌ی تنشی که به تسلیم رسیده است متصل می‌ماند تا زمانی که باربرداری رخ دهد.

$$d\alpha_{nij} = c_n de_{pij} \quad (9)$$

قانون جریان نرمال به‌طوری فراخوانده می‌شود که بردار تغییرات کرنش پلاستیک عمود بر سطح تسلیم است و ارتباط بین تنش و کرنش متوسط به‌صورت الاستیک فرض می‌شود:

$$de_m = d\sigma_m / 3K \quad (10)$$

که k مدول بالک است.

مدل بر اساس نتایج آزمایشگاهی نظیر برش ساده و پیچش دینامیک تنظیم شده است. مقادیر k_n و c_n بر اساس مقادیر آزمایشگاهی در نظر گرفته می‌شود. عمق آبرفت از ۱۰۰ متر (کم‌عمق) تا ۵۰۰ متر (عمیق) در نظر گرفته شده است. مرزها به‌صورت مرز انتقال‌دهنده در نظر گرفته شده است تا امواج بتواند از محیط خارج شود.

نتایج اثرات غیرخطی بودن مصالح در اثر اعمال موج SH که به‌صورت عمودی به مدل وارد می‌گردد بدین شرح است:

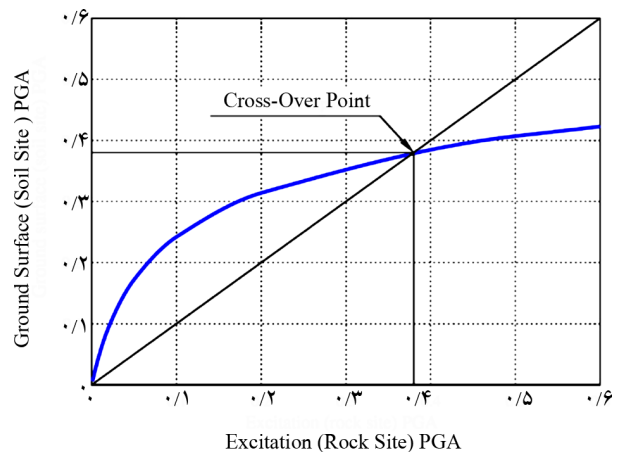
شده توسط جویئر (Joyner, 1975) است که اصلاحات جزئی روی آن انجام گرفته است و برای تحلیل یک‌بعدی از کد باردت و تویبات (Bardet, 2001) بهره گرفته شده است. برای هر دو کد از یک روش برای پیاده‌سازی مدل غیرخطی خاک در رابطه (۱۱) استفاده شده است. موج ورودی به مدل هم از نوع SH است.

نتایج به‌دست آمده در تحقیق به شرح زیر است:

۱. در مدل‌های دو بعدی نقاط تقاطع در نسبت W/H های مختلف تغییرات قابل توجهی در طول سطح زمین دارد. در مرکز دره با نسبت $W/H = 6$ ، نقاط تقاطع نزدیک به مدل یک‌بعدی و همچنین مقدار پیشنهادی ادریس (Idriss, 1990) است؛ اما در سایر نقاط به‌طور قابل توجهی متفاوت است.
۲. به دلیل اثرات دره، نقاط تقاطع برای همه دوره‌های تناوب، در نقاط نزدیک مرکز دره، با کاهش نسبت W/H تمایل به افزایش دارد.
۳. در هر سه دره موجود در تحریکات ضعیف و متوسط، نسبت بزرگنمایی مدل‌های دو بعدی بزرگ‌تر از مدل‌های یک‌بعدی هستند که بخشی از دلایل آن نبود میرایی ویسکوز الاستیک است.
۴. در تحریکات قوی، در مدل‌های یک بعدی و دو بعدی با نسبت $W/H = 6$ ، نسبت بزرگنمایی در مرکز دره خیلی شبیه به هم هستند. این نتیجه نشان می‌دهد که می‌توان از مدل‌های یک‌بعدی برای ارزیابی نسبت بزرگنمایی دره‌هایی با نسبت $W/H \geq 6$ در بخش عمده‌ای از مرکز دره استفاده کرد. منحنی‌های تشدید میانگین به‌دست آمده از این تحقیق را می‌توان برای طیف پاسخ احتمالی برای خاک‌های نرم استفاده کرد.

۳-۳- آيسان و خان‌بابازاده (Iyisan & Khanbabazadeh, 2013)

در سال ۲۰۱۳ اولین تحقیق آيسان و خان‌بابازاده (Iyisan & Khanbabazadeh, 2013) در این زمینه انجام گرفت. در این تحقیق به بررسی اثرات کناره‌ی دره بر رفتار دینامیکی دره‌ها



شکل (۵): نمایش شماتیک نقاط تقاطع.

در این تحقیق از سه دره متقارن با هندسه‌ای ساده استفاده شده است. عمق دره‌ها ۳۰ متر و سرعت موج برشی ۱۷۵ متر بر ثانیه و شیب لبه‌ها ۴۵ درجه است. در سه نسبت ۱۰، ۶، ۳ $W/H =$ محاسبات انجام گرفته است. یک لایه سنگ ضعیف با سرعت موج برشی ۷۵۰ متر بر ثانیه زیر خاک دره و بالای سنگ بستر که سرعت موج برشی در آن ۱۰۰۰ متر بر ثانیه لحاظ شده، قرار گرفته است که شرایط مدل را به واقعیت نزدیک می‌کند. در کناره‌ها و کف مدل از مرزهای ویسکوز استفاده شده است. رفتار غیرخطی خاک مدل با استفاده از رابطه (۱۱) اعمال شده است:

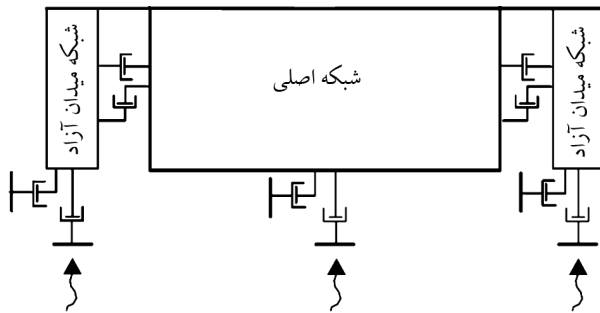
$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\max} + G_{\max} \gamma} \quad (11)$$

که $G = \tau / \gamma$ مدول برشی سکانتی همچنین τ و γ تنش و کرنش برشی هستند. با توجه به مدل‌های تجربی، مقاومت برشی خاک $\tau_{\max} = 73/9$ کیلوپاسکال لحاظ می‌گردد.

$G_{\max} = \rho V_s^2$ مدول برشی الاستیک در کرنش‌های کوچک است که $\rho = 18$ کیلونیوتن بر مترمکعب چگالی خاک و V_s سرعت موج برشی خاک هستند. در این تحقیق منحنی‌های بک‌بون تنش-کرنش برشی به ده بخش خطی تقسیم شده است که هر بخش به وسیله‌ی یک المان الاستوپلاستیک کامل با سطح تسلیم ارائه شده جویئر، نمایش داده می‌شود.

کد به کار گرفته شده جهت تحلیل دو بعدی، همان کد تهیه

میدان آزاد که شامل اجرای محاسبات میدان آزاد به موازات تجزیه و تحلیل شبکه اصلی است، در FLAC3D توسعه یافته است. ترکیب این دو فرمولاسیون پیشرفته در این تحقیق استفاده شده است. شکل (۶) ترکیب شماتیک شبکه اصلی به شبکه‌های میدان آزاد به واسطه‌ی میراگرهای ویسکوز نشان می‌دهد.



شکل (۶): ترکیب شماتیک شبکه اصلی به شبکه‌های میدان آزاد به واسطه‌ی داشپات‌های ویسکوز.

نتایج این تحقیق بیانگر این است که تغییر در زاویه سنگ بستر نه تنها روی مقادیر حداکثر طیف بزرگنمایی تأثیر گذار است، بلکه محل رخداد این مقادیر حداکثر را نیز در طول دره تغییر می‌دهد. همچنین نتایج در حوزه‌ی فرکانس نشان می‌دهد که بخش‌های مختلف دره به دوره تناوب‌های مختلفی حساس هستند. با توجه به نتایج، اثرات کناره‌های دره در سایت ماسه‌ای نسبت به سایت رسی بیشتر است.

با توجه به بررسی‌ها در حوزه فرکانس قسمت‌های مختلف دره به دوره تناوب‌های متفاوتی حساسیت دارند. در حالی که بخش‌های جانبی دره به دوره تناوب‌های پایین حساس هستند، حداکثر تشدید در بخش‌های داخلی در دوره تناوب‌های بالا رخ می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، رفتار دو بعدی نه تنها بر بخش‌های جانبی دره غالب است، بلکه بر رفتار بخش‌های داخلی اثر می‌گذارد. همچنین تحلیل‌های یک‌بعدی برای پیش‌بینی رفتار دو بعدی کافی نیست. به علاوه در این تحقیق نتایج گویای این مسئله است که بزرگای حرکت بر رفتار دو بعدی اثرات مهمی می‌گذارد، خصوصاً اینکه دوره تناوب تشدید در تحریکات بالا افزایش می‌یابد.

پرداخته شده است. بررسی‌های عددی با استفاده از کد غیرخطی که شرایط مرزی را در حالت استاتیک و دینامیک به خوبی مدل می‌کند، انجام شده است. این مدل میرایی هیستریزس را بر اساس منحنی‌های کاهشی که توسط کاربر تعریف می‌شود اعمال می‌کند که برای مصالح دانه‌ای و رسی استفاده می‌شود.

به دلیل کارایی بالای روش تفاضل محدود در تأمین انعطاف‌پذیری در مدل‌سازی هندسه‌های نامنظم و رفتار غیرخطی خاک که اهمیت بالاتری در تحلیل‌های دو بعدی دارند، از نرم‌افزار FLAC 3D (Cundall, 2008) استفاده شده است.

از آنجا که ویژگی‌های مصالح بر رفتار لرزه‌ای دره تأثیرگذار است، رفتار دو نوع مصالح ماسه‌ای و رسی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است که ویژگی‌های این خاک‌ها متناسب با آیین‌نامه‌های طراحی است. مدل رفتاری به کار گرفته شده، مدل موهر-کلمب است. این مدل می‌تواند کرنش تجمعی برگشت‌ناپذیر (ریزش یا لغزش در سطوح برشی) را که در حین بارهای لرزه‌ای ممکن است رخ دهد، مدل کند. موقعیت نقطه تنش در این مدل در شکست برشی به وسیله‌ی یک قانون جریان غیر همراه و در شکست کششی به وسیله‌ی یک قانون جریان همراه کنترل می‌شود.

علاوه بر شرایط مرزی استاتیک معمول، از طرح مرز آرام که توسط لیسمر و کولمایر (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973) توسط لیسمر و کولمایر (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969) پیشنهاد شده استفاده شده است. این مرزها شامل میراگرهایی است که به‌طور مستقل در جهت عمودی و برشی به مرزها متصل شده است. این بخش‌های ویسکوز به صورت مستقیم در معادلات حرکت نقاط شبکه واقع در مرز اعمال نمی‌شوند؛ اما تنش‌های برشی و نرمال به ترتیب اعمال بارهای مرزی در هر مرحله زمانی محاسبه و اعمال می‌شوند. مرزهای جانبی مدل به صورت مرزهای میدان آزاد در نظر گرفته می‌شوند. روش این گونه است که حرکت میدان آزاد به گونه‌ای اعمال شود که مرزهای جانبی ویژگی‌های غیر بازتابی خود را حفظ کنند. این رویکرد در کد تفاضل محدود پیوسته NESSI (Cundall et al., 1980) استفاده شده، از طریق شرایط مرزی

دینامیکی دره‌ها با روش دقیق‌تر ارزیابی شده است. در دره‌های ماسه‌ای دیده شده است که در تحریکات ضعیف اثر به دام افتادن امواج در بخش‌های شیب‌دار و ویژگی میرا بودن ماسه سست باعث کاهش اثر رفتار دو بعدی نسبت به یک‌بعدی می‌شود. الگوی متفاوتی در ماسه با تراکم متوسط دیده شده است. حداقل مقدار بزرگنمایی به دره با ماسه‌ی متراکم تعلق دارد. تنوع رفتار با افزایش سطح تحریک مشاهده شده است.

۳-۴- ژو و همکاران (Zho et al., 2015)

ژو و همکاران در این تحقیق اثرات زاویه‌ی برخورد موج SH ورودی را بر پاسخ لرزه‌ای دره رسوبی دو بعدی با روش غیرخطی بررسی می‌کنند. در ابتدا موج ریکر برای تحلیل‌هایی با جزئیات بیشتر استفاده شده است و در پی آن تحلیل‌های آماری بر اساس ۱۰۰ رکورد زلزله واقعی انجام شده است. در این تحقیق اثر زاویه برخورد موج بر پاسخ دره با استفاده از به‌کارگیری مدل دو بعدی و به‌کارگیری کد غیرخطی جوینر (Joyner, 1975) و مارش (Marsh, 1992) انجام شده است.

محاسبات توسط یک طرح تفاضل محدود صریح انجام می‌شود که گام به گام در فضا و زمان پیش می‌رود. تحریکات، امواج برشی با زوایای برخورد متفاوت در محیط زیرین هستند. مدل رفتاری خاک به کار رفته در این تحقیق همان مدل استفاده شده در تحقیق ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2009) است. میراگرهای ویسکوز در دو طرف مرزهای قائم اطراف قرار دارند. در فاصله‌ی ۱۸۰ متری از لبه‌های دره و همچنین در مرز افقی کف دره لبه‌های دره و همچنین در مرز افقی کف دره در فاصله ۷۸ متر زیر سطح زمین قرار گرفته است تا اجازه تشعشع انرژی داده شود. این تحقیق دو بخش دارد:

۱. در مرحله اول دره با استفاده از موج ریکر تحریک شده است و اثرات زاویه برخورد بر PGA و SRA با جزئیات دیده شده است.
۲. در مرحله دوم ۱۰۰ رکورد زلزله‌ی واقعی به‌عنوان تحریک ورودی استفاده شده است و هر کدام با زاویه‌ی ورودی

در تحقیق دیگری که خان‌بابازاده در سال ۲۰۱۴ (Khanbabazadeh, 2014) انجام داد به بررسی اثرات لایه‌بندی و تغییر در نوع مصالح، بر رفتار دینامیکی دره‌های رسی پرداخته شده است. همچنین مشاهدات بیانگر این مسئله است که کمترین بزرگنمایی در میان مصالح رسی مختلف در دره‌های رسی سخت تک لایه رخ داده است و بیشترین بزرگنمایی متعلق به دره‌های رسی نرم دو لایه است. همچنین بیشترین بزرگنمایی مرکز دره، در دره‌ی رسی نرم دو لایه اتفاق افتاده است. نتایج تحلیل‌های دو بعدی، تفاوت رفتار دینامیکی دره‌های تک‌لایه و دو لایه را نشان می‌دهد که این تفاوت از نظر مقدار و محل رخداد حداکثر بزرگنمایی و دوره تناوب تشدید است. مشاهده می‌شود که قسمت‌های کم‌عمق جانبی دره نسبت به دوره تناوب‌های پایین‌تر حساس هستند در حالی که قسمت‌های داخلی به دوره تناوب‌های بالاتر حساسیت دارند. در میان همه‌ی تفاوت‌ها، مهم‌ترین تفاوت دیده شده بین رفتار دره‌ی تک‌لایه و دو لایه در دوره تناوب تشدید بخش‌های داخلی دره است. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً در همه موارد دوره تناوب تشدید در نقاط داخلی دره‌های تک‌لایه کمتر از دره‌های دو لایه است.

در سال ۲۰۱۶ خان‌بابازاده و همکاران (Khanbabazadeh et al., 2016) تحقیق دیگری را انجام دادند که ابتدا مدل دو بعدی دره بر پایه اکتشافات زیرزمینی و تحقیقات زمین‌شناسی در نظر گرفته می‌شود.

تمرکز زیاد خسارات در لبه‌های دره دینار در هنگام زلزله‌های رخ داده که در مناطق نزدیک به رخنمون سنگی است، تأثیر اثر سنگ بستر مایل بر رفتار دینامیکی حوزه را با هندسه دو بعدی نشان می‌دهد. همچنین در این مقاله از روش خطی معادل برای مدل کردن عبور امواج در لایه‌ها و برهم‌کنش دینامیکی خاک و سازه استفاده شده است.

در سال ۲۰۱۸ آخرین تحقیق خان‌بابازاده و همکاران (Khanbabazadeh et al., 2018) صورت گرفت. در این تحقیق با به‌کارگیری روش تحلیل کاملاً غیرخطی، همواره با یک مدل هیسترتیک و بدون میرایی مازاد، اثرات کناره‌های دره بر رفتار

۴- مطالعات انجام شده با روش المان محدود

۴-۱- سان و چانگ (Sun & Chung, 2008)

در این تحقیق مطالعات در مورد منطقه‌ی گیونجئو انجام گرفته است. بررسی‌های سایت با استفاده از حفاری گمانه و تست‌های لرزه‌ای در محل انجام گرفته است. مطالعات مزبور در مورد سایت منطقه نشان می‌دهد دره این منطقه شکلی کم‌عمق و عریض دارد که نسبت عمق به عرض آن ۰/۱۵ است. این مطالعات بر اساس روش GTIS که پایه‌ی آن GIS است انجام گرفته است. میرایی مصالح از نوع رایلی است و ۵ درصد در نظر گرفته شده است (وابسته به فرکانس). تحلیل‌ها با استفاده از روش المان محدود در دو بعد انجام شده تا تأثیر ساختگاه در دو مقطع دره شکل در این ناحیه دیده شود. تحلیل‌های عددی در دو مقطع انجام گرفت و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. پارامترهای لازم برای اعمال رفتار غیرخطی خاک با استفاده از آزمایش ستون تشدید به دست آمده است. مرزهای جاذب در اطراف هندسه مدل در نظر گرفته شده است که به کمک میراگرهای ویسکوز مدل‌سازی شده است. جهت انجام تحلیل‌های عددی از دو نوع تحریک با مدت‌زمان‌های ۱۶ ثانیه و ۲۵ ثانیه که با $g = 0.1 \text{ PGA}$ استفاده شده است. تحریک ۱۶ ثانیه‌ای دارای محتوای فرکانسی متنوعی از محدوده‌ی با فرکانس پایین تا فرکانس بالاتر از ۱۰ هرتز است، در حالی که تحریک ۲۵ ثانیه‌ای دارای محتوای فرکانسی غالب در محدوده ۱/۵ تا ۴/۵ هرتز می‌باشد. در اولین گام حداکثر شتاب افقی در سطح زمین ارزیابی شده است و همچنین نسبت حداکثر شتاب سطح زمین و سنگ بستر در طول سطح محاسبه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مدت‌زمان تحریک در سطح در نزدیکی کناره‌های دره، به دلیل ایجاد امواج سطحی ناشی از اندرکنش موج برشی با هندسه‌ی دره افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر، مرکز دره حرکات با فرکانس پایین را برخلاف مکان‌های کنار و نزدیک لبه‌های دره نشان می‌دهد، زیرا محتویات با فرکانس بالا امواج ورودی که به صورت عمودی در امتداد لایه‌های افقی خاک منتشر می‌شود فیلتر می‌شود.

صفر تا ۹۰ درجه به مدل اعمال شده است.

در کل ۲۰۰۰ مدل عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است و با استفاده از تحلیل‌های آماری زیان‌آورترین زاویه برخورد و بحرانی‌ترین نقاط دره برآورد شده است. نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱. زاویه‌ی برخورد موج SH اثر قابل توجهی بر حرکت زمین دره دارد. برای سازه‌های با دوره تناوب پایین بحرانی‌ترین زاویه برخورد لزوماً صفر درجه نیست اما تقریباً در محدوده‌ی ۰ تا ۳۰ درجه است؛ در حالی که برای سازه‌های با دوره تناوب بالا اثرات زاویه برخورد محدود است و از این رو تحلیل برخورد عمودی به‌تنهایی کافی است؛ اما در ارزیابی لرزه‌ای ریسک فقط برخورد عمودی در نظر گرفته می‌شود که این کار به‌ویژه برای سازه‌های با دوره تناوب طبیعی پایین (فرکانس بالا) باعث می‌شود که حرکت ورودی دست‌پایین در نظر گرفته شود که در این حالت باید اثرات زاویه برخورد لحاظ شود.
 ۲. دوره تناوب غالب طیف پاسخ شتاب به محل و زاویه برخورد حساسیتی ندارد.
 ۳. برای سازه‌های با دوره تناوب پایین، بخش‌های مرکزی دره از نظر لرزه‌ای نسبت به لبه‌های دره مناسب‌ترند و برای سازه‌های دوره تناوب بالا برعکس است. هرچند با افزایش زاویه برخورد این تفاوت رفته‌رفته از بین می‌رود.
 ۴. زاویه شیب دره اثر قابل توجهی بر الگوی توزیع PGA دارد. زاویه شیب تعیین می‌کند که حداکثر پاسخ در لبه‌ی دره ظاهر می‌شود یا خیر. بحرانی‌ترین نقاط دره بیشتر در محدوده‌ی لبه شیب دره قرار دارد که در معرض برخورد عمودی یا برخورد مایل با زاویه برخورد کوچک قرار می‌گیرد.
- نتایج نشان می‌دهد که زاویه برخورد اثر قابل توجهی در حرکت زمین در دره دارد. این مطالعه تأثیر قابل توجه زاویه برخورد را که تاکنون در عمل مهندسی به آن توجه نشده است، نشان داد. در نتیجه این تحقیق از هر دو دیدگاه نظری و عملی کاربردی است.

سه نوع تحلیل انجام گرفته است:

۱. تحلیل ویسکوالاستیک با به کارگیری کد المان محدود در نرم‌افزار آباکوس (۲۰۰۸) (ABAQUS, Inc., 2008)
۲. تحلیل خطی معادل با به کارگیری کد المان محدود QUAD4M (Hudson et al., 1994)
۳. تحلیل غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس

با استفاده از مقایسه تحلیل خطی و غیرخطی اثرات غیرخطی بودن خاک دیده می‌شود. جهت مدل‌سازی خاک در این تحقیق از مدل رفتاری (مدل مشخصه غیرخطی سخت‌شوندگی کینماتیک) استفاده شده است که توسط آناستوپولوس (Anastasopoulos et al., 2010) توسعه یافت.

قانون تکامل مدل شامل دو بخش است: یک مؤلفه سخت‌شوندگی کینماتیک غیرخطی که بیانگر حرکت انتقالی سطح تسلیم در فضای تنش است و از طریق پارامتر تنش برگشتی (α) تعریف می‌شود و دیگری یک مؤلفه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک که تغییر در تنش معادل کنترل‌کننده‌ی اندازه سطح تسلیم را نشان می‌دهد و با پارامتر σ_0 که تابعی از تغییر شکل پلاستیک است بیان می‌شود. این مدل بر اساس معیار شکست فون‌میسز بیان شده است که برای شبیه‌سازی پاسخ مصالح رسی زهکشی نشده با یک قانون جریان همراه پلاستیک در نظر گرفته شده است.

ارتباط تنش‌ها از طریق رابطه (۱۲) بیان می‌گردد:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha_g \quad (12)$$

مؤلفه‌ی کینماتیک سطح تسلیم طبق رابطه (۱۳) تعریف می‌شود:

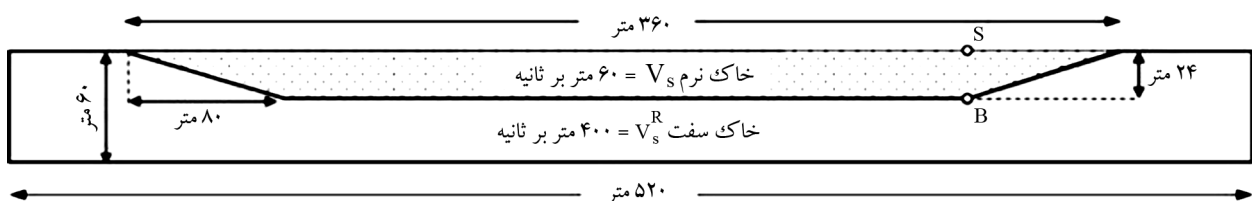
$$\alpha = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \bar{\varepsilon}^{pl} - \gamma \alpha \bar{\varepsilon}^{pl} \quad (13)$$

نتایج تحلیل‌های یک‌بعدی و دو بعدی در بیشتر نقاط دره مشابه است به جز نواحی نزدیک به لبه‌های دره (به این علت که دره خیلی کم عمق است) با مقایسه‌ی نتایج یک‌بعدی و دو بعدی مشاهده می‌شود که در بخش‌های هموار ناحیه تحلیل‌های یک‌بعدی قابل قبول است و از اثرات دره در دره‌های کم عمق و عرض می‌توان چشم‌پوشی کرد.

۲-۴- گلوگاتی و همکاران (Gelagoti et al., 2010)

در این مقاله محققین به بررسی عددی رفتار لرزه‌ای یک دره کم عمق با خاک نرم پرداخته‌اند تا به میزان حساسیت پاسخ لرزه‌ای دره‌ی آبرفتی دو بعدی به پارامترهایی مهم نظیر محتوای فرکانسی موج ورودی و غیرخطی بودن خاک برسند.

دره‌ی اوها اوهاشی به عنوان نمونه در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. روش عددی به کاررفته در تحلیل این دره روش المان محدود در حوزه زمان است و مدل به صورت تنش مسطح است. هندسه مدل که در تحلیل‌ها استفاده شده است مطابق شکل (۷) است. خاک به وسیله‌ی المان‌های چهارضلعی پیوسته با جداسازی بسیار کوچکی مدل شده تا از انتشار امواج اطمینان حاصل شود. خاک دره همگن فرض شده است و سرعت موج برشی آن $V_S = 60$ متر بر ثانیه و سرعت موج برشی لایه‌ی زیرین $V_S = 300$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. امیدانس بین خاک و بستر $\rho_2 V_{S2} < \rho_1 V_{S1}$ حدوداً برابر ۱۰ می‌باشد. از انعکاس امواج از بستر به دلیل استفاده از مرزهای جذب در کف جلوگیری شده است. در اطراف مدل مرزهای میدان آزاد در نظر گرفته شده که با ستون‌های برشی در مرزهای جانبی مدل، تحریک ایجاد شده ناشی از امواج SV که به صورت عمودی در صفحه وارد می‌شود را شبیه‌سازی می‌کند.



شکل (۷): هندسه مدل دو بعدی دره اوها.

می‌گردد و در لبه‌ها این فاکتور کاهش می‌یابد. در تحریک با فرکانس پایین اثرات تمرکز امواج که به وسیله‌ی امواج سطحی تولید شده تحت شعاع قرار گرفته است، باعث جابه‌جایی محلی تشدید ماکزیمم به سمت مرکز دره می‌شود. برخورد امواج سطحی ایجاد شده در لبه‌های و انتشار آنها در سطح و برخورد آنها با موج SV علت به وجود آمدن فاکتور تشدید بالا در نزدیکی‌ها و مرکز دره است.

۴-۲-۲- اثرات غیرخطی بودن خاک

اثرات غیرخطی بودن خاک در سه زمینه مورد بررسی قرار گرفته است:

۱. تحلیل ویسکو الاستیک که غیرخطی بودن خاک بسیار خفیف مورد توجه قرار می‌گیرد و فقط افزایش ضریب میرایی (ξ) ارزیابی شده است.
 ۲. تحلیل خطی معادل که سطح متوسطی از غیرخطی بودن خاک با استفاده از تکرار، مدول برشی و میرایی متناسب با سطح کرنش برشی در نظر گرفته شده است.
 ۳. تحلیل غیرخطی که رفتار خاک با استفاده از مدل رفتاری (مدل مشخصه غیرخطی سخت‌شوندگی کینماتیک) کاملاً غیرخطی مدل‌سازی شده است.
- مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار پاسخ مرکز دره که ناشی از برخورد امواج سطحی است، با افزایش میرایی کاهش می‌یابد. در مقابل افزایش میرایی تأثیری در فاکتور تشدید لبه‌ها ندارد. در حالتی که تحریک ورودی با فرکانس بالا باشد افزایش میرایی تأثیری در توزیع فاکتور تشدید در طول سطح دره ندارد. در این مورد فاکتور تشدید شدیداً به اثرات تمرکز وابسته است که نتیجه‌ی انعکاس پی‌درپی امواج در سطح زمین و شیب سنگ بستر است. این مکانیسم به هندسه‌ی مدل وابسته است و تحت تأثیر میرایی نیست. از طرفی امواج سطحی تولید شده در لبه‌ها که به سمت مرکز دره انتشار پیدا می‌کند و باعث افزایش فاکتور تشدید می‌گردد، به دلیل افزایش میرایی از بین می‌روند و تغییری در آن ایجاد نمی‌شود. این پدیده در مورد تحریک با فرکانس متوسط و

که در این رابطه C مدول سخت‌شوندگی کینماتیک اولیه است که:

$$C = \sigma_y / \varepsilon_y = E \quad (14)$$

و γ پارامتری است که نرخ کاهش سخت‌شوندگی کینماتیک با افزایش تغییر شکل پلاستیک را نشان می‌دهد. پارامترهای مدل با منحنی‌های $G-\gamma$ موجود در ادبیات فنی که توسط گروولیموس و همکاران (Gerolymos et al., 2005) ارائه شده، کالیبره شده است. موارد مورد بررسی در این تحقیق اثرات محتوای فرکانسی و اثرات غیرخطی بودن مصالح بر پاسخ لرزه‌ای است.

۴-۲-۱- اثرات محتوای فرکانسی

برای بررسی اثرات محتوای فرکانسی بر پاسخ لرزه‌ای دره از امواج ریکر با فرکانس‌های غالب متفاوت استفاده شده است. موج با فرکانس غالب بالا (۳ هرتز)، فرکانس غالب متوسط (۱ هرتز) و فرکانس غالب پایین (۰/۵ هرتز) که به محیط اعمال شده است. در تحریک با فرکانس بالا تقویت خاک در مرکز دره غالب است. فاکتور تشدید (AG) (نسبت PGA در تحلیل دو بعدی به یک بعدی) ($AG = A_{2D} / A_{1D}$) در مرکز دره تقریباً برابر $AG \approx 1.3$ است، در حالی که در حالت دو بعدی در نزدیکی لبه‌های دره متمرکز شده است. در این محدوده به دلیل به دام افتادن امواج حجمی مایل وارد شده به محیط این تقویت امواج رخ می‌دهد ($AG \approx 1.3$). این پدیده باعث خسارت زیادی در زلزله‌هایی نظیر زلزله کاراکاس در ۱۹۶۷ شد.

در تحریک با فرکانس متوسط، توزیع فاکتور تشدید (AG) در طول سطح دره روند متفاوتی نسبت به حالت فرکانس بالا دارد و حداکثر مقدار فاکتور تشدید در نزدیکی مرکز دره رخ می‌دهد و این مقدار در نقطه به نقطه‌ی سطح دره نوسان دارد. اثرات دو بعدی که ناشی از انعکاس امواج در شیب سنگ بستر است و در تحریک با فرکانس بالا به وضوح این اثر دیده می‌شود، در این حالت به دلیل افزایش طول موج، اثر نامنظمی توپوگرافی تغییراتی در پاسخ لرزه‌ای ایجاد نمی‌کند. از طرفی انتشار امواج سطحی به سمت مرکز دره باعث افزایش فاکتور تشدید در این ناحیه

۳-۴- گلوگاتی و همکاران (Gelagoti et al., 2012)

در این مقاله به بررسی پاسخ لرزه‌ای دره با تأکید بر دو بعدی بودن هندسه مسئله و رفتار غیرخطی مصالح پرداخته شده است. روش و متدولوژی تحقیق مشابه با تحقیق انجام گرفته‌ی گلوگاتی و همکاران (Gelagoti et al., 2010) می‌باشد. دره‌ی مورد بررسی دره‌ی اوهاواوهای است که در تحقیقات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است و تحریک ورودی از نوع موج ریکر است، یکی با فرکانس بالا و دیگری با فرکانس پایین می‌باشد.

در این تحقیق به بررسی اثرات پارامترهای بدون بعد بر پاسخ لرزه‌ای دره آبرفتی پرداخته شده است. این پارامترها عبارتند از:

۱. فاکتور شکل دره (s): زاویه‌ی شیب را بیان می‌کند.
۲. نسبت امیدانس (i): سختی خاک را نسبت به سنگ بستر بیان می‌کند.
۳. نسبت طول موج (λ/s): تابعی از سختی خاک و فرکانس تحریک است.
۴. نسبت صلیبیت (v): سختی خاک را نسبت به مقاومتش بیان می‌کند.
۵. نسبت مقاومت (r): درجه‌ی غیرخطی بودن خاک را بیان می‌کند.

برای توجیه کردن محدودیت عمومی نتایج حاصل از مطالعات موردی در این تحقیق تلاش شده است که حساسیت پاسخ لرزه‌ای دره نسبت به سختی خاک و غیرخطی شدن خاک نمایش داده شود. برای بررسی اثرات سختی خاک، پاسخ خطی دو بعدی سه دره‌ی همگن با هندسه‌ی یکسان مقایسه شده است. در این سه دره تنها سرعت موج برشی متفاوت است؛ در حالت نرم $V_{S1} =$ متر بر ثانیه حالت نسبتاً نرم $V_{S2} = 150$ متر بر ثانیه و حالت نسبتاً سخت $V_{S3} = 200$ متر بر ثانیه و سرعت موج برشی سنگ بستر لرزه‌ای $V_R = 400$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در حالت نسبتاً سخت، لرزش تقریباً به تمامی نقاط سطح دره می‌رسد اما تغییرات چشمگیری در مدت زمان لرزش ایجاد نمی‌کند. در این حالت امواج تأثیری در مرکز دره ایجاد نمی‌کند اما در حالت دره‌ی نرم بر نقاط مرکزی دره تأثیرات چشمگیری دیده می‌شود

حتی پایین هم با وضوح بیشتری به چشم می‌خورد. اگر پاسخ الاستیک باشد جزئیات تحریک لرزه‌ای نقشی را در تمرکز اثرات در کناره‌های دره ندارد اما تفاوت مهمی را در مرکز دره ایجاد می‌کند یعنی جایی که امواج سطحی غالب هستند. در یک تحریک تک‌پالس تشدید در مرکز دره با افزایش غیرخطی بودن خاک کاهش می‌یابد، به‌طور قابل توجهی برای یک تحریک واقعی با تشدید در کناره‌های دره با غیرخطی بودن خاک افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که محل رخداد حداکثر مقدار فاکتور تشدید در حالت خطی و خطی معادل، تقریباً با یکدیگر برابر است. این بدان معناست که در تحریک با فرکانس بالا، کرنش برشی موجود خاصیت غیرخطی زیادی را در خاک ایجاد نمی‌کند. در تحریک با فرکانس متوسط و پایین، خاصیت غیرخطی ایجاد شده باعث از بین رفتن اثرات دو بعدی و کاهش فاکتور تشدید ناشی از امواج ریلی می‌شود. این روند هم در روش خطی و هم در حالت غیرخطی مشهود است. با افزایش غیرخطی شدن خاک پاسخ در لبه‌های دره زیاد می‌شود. علت این پدیده را می‌توان با این فرضیه توجیه کرد:

پلاستیک شدن خاک در نزدیکی خط اتصال خاک و سنگ تمایل به شکل‌گیری یک ناحیه بسیار نرم پلاستیک دارد. در مورد اعمال موج ریکر پلاستیک شدن خاک مانند یک مکانیسم میرایی عمل می‌کند و منجر به کاهش فاکتور تشدید می‌شود؛ اما در مورد یک تحریک واقعی که تعداد سیکل قوی زیادی دارد رفتار متفاوت است. بر اثر ورود اولین سیکل قوی ورودی ناحیه نرم شدگی ایجاد می‌شود و بعد از آن به‌عنوان دامی برای امواج ورودی بعدی عمل می‌کند و آنها را در خود متمرکز می‌کند و به همین علت باعث ایجاد فاکتور تشدید بالاتری می‌شود. اگر این فرضیه درست باشد باید در حالتی که سیکل‌های شدیدتری اعمال می‌شود بیشتر دیده شود که با توجه به نتایج دیده می‌شود در زلزله‌ی لافکادا (۲۰۰۳) که تحریک قوی‌تر است این اثر با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. با افزایش غیرخطی شدن خاک فاکتور تشدید در مرکز دره در طول دره کاهش می‌یابد و به علت این است که میرایی هیستریس افزایش یافته و باعث اثرگذاری بر امواج سطحی است.

خاک غیرخطی فرض شود پاسخ دو بعدی از الگوی معمول پیروی می کند که مستقل از λs است. حداکثر مقدار فاکتور تشدید در نزدیک لبه های دره محدود می شوند و همین طور در جاهایی که در حالت خطی محل تضعیف حرکت زمین پیش بینی شده بود.

(ت) اثر نسبت مقاومت (r): به عنوان شاخصی تعریف می شود که مقاومت برشی بسیج شده ی خاک در حین زلزله را بیان می کند. با توجه به فرمول حداقل مقدار r متناسب است با حالتی که رفتار خاک غیرخطی فرض شده است. برای بررسی اثرات این عامل در یک دره ی مشخص دو حالت برای r در نظر گرفته می شود ($r=0/2$ پاسخ غیرخطی، $r=0/1$ پاسخ خیلی غیرخطی) و تحلیل ها انجام گرفته است. با افزایش غیرخطی شدن خاک اثرات دو بعدی به شدت در لبه های دره متمرکز می شود و فاکتور تشدید با نزدیک شدن به مرکز دره کاهش می یابد. در $r=0/1$ رفتار غیرخطی خاک بیشتر است (به دلیل شدید بودن بزرگای زلزله و به تبع کرنش برشی بالاتر) و باعث می شود G کاهش یابد. این کاهش G در مقایسه با G_0 (در حالت کرنش های کم) باعث تولید طول موج کوتاه تر شده (چون طول موج وابسته به G است) و همین امر باعث به دام افتادن امواج در لبه های دره می گردد و باعث افزایش تقویت در این ناحیه می گردد. در $r=0/2$ چون کرنش برشی نسبت به حالت بالا ضعیف تر است باعث می گردد که این به دام افتادن امواج به میزان کمتری رخ می دهد و به تبع فاکتور تشدید کمتری نسبت به حالت قبل داشته است.

۴-۴- سینکرایان (Sincraian, 2000)

تحلیل رفتار لرزه ای خاک در نقاط مختلف تپه ای در یکی از جزایر گروه مرکزی آزر، تأثیر افزایش میزان PGA بر پاسخ لرزه ای خاک، مقایسه نتایج مدل تحلیل با رکوردهای ثبت شده در پس لرزه های زلزله سال ۱۹۹۵ و بررسی حساسیت تعدادی از پارامترهای مدل بر پاسخ از اهداف این تحقیق می باشد. این تحقیق با استفاده از نرم افزار آباکوس و روش عددی المان محدود ارائه شده است.

که این تغییر را می توان به امواج رایلی تولید شده در لبه ها که به سمت مرکز دره منتشر می شوند نسبت داد و همچنین باعث افزایش مدت زمان موج ورودی بر روی سطح زمین می شود.

۴-۳-۱- بررسی اثرات پارامترهای بدون بعد بر پاسخ لرزه ای دره آبرفتی

(الف) اثر فاکتور شکل دره (s): برای بررسی این مورد، سه دره با شیب لبه های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. دره اول همان هندسه دره اوها اوهاشی است و دو دره دیگر هم بررسی شد. نتایج نشان می دهد که همان طور که شیب دره ملایم تر می شود، تشدید به وضوح دیده می شود. وقوع این رخداد به این علت است که هرچه شیب کمتر می شود تولید انعکاس و انکسار در لبه های دره بیشتر می شود و متعاقباً احتمال برخورد امواج در سطح بالا می رود. برعکس این اتفاق در دره های پر شیب رخ می دهد. در این نوع دره ها حتی ممکن است تضعیف امواج در حرکت افقی زمین رخ دهد. اثرات شیب وقتی رفتار خاک غیرخطی در نظر گرفته می شود به شدت کاهش می یابد.

(ب) اثر نسبت امیدانس (i): برای بررسی اثر این مورد سه نسبت امیدانس مختلف مورد تحلیل قرار گرفت؛ $i \approx 12$ (نسبتاً بالا)، $i \approx 5$ (متوسط) و $i \approx 2/5$ (پایین) فاکتور تشدید با افزایش i افزایش می یابد اما الگوی توزیع فاکتور تشدید در سطح در نسبت امیدانس های مختلف تغییر نمی کند. در صورتی که رفتار خاک غیرخطی در نظر گرفته شود اثرات نسبت امیدانس کاهش می دهد.

(پ) اثر نسبت طول موج: برای بررسی تأثیر این عامل در یک

دره ی مشخص سه نوع مختلف موج ریکر با $\lambda s = 1, 2, 3$ اعمال شده است. این عامل الگوی توزیع فاکتور تشدید در سطح را تحت تأثیر قرار می دهد. در حالت الاستیک زمانی که $\lambda s = 3$ طول موج بالا باشد تولید امواج رایلی عامل بالا بودن $AG \approx 1/2, 1/4$ است. همان طور که λs کاهش می یابد تمرکز انکسار پرتوها در گوه ها غالب می گردد و حداکثر مقدار فاکتور تشدید به سمت لبه های دره جابه جا می شود. در صورتی که رفتار

دراکر پراگر است.

سطح تسلیم مدل Drucker-Prager دارای دو بخش اصلی است:

۱. یک بخش شکست برشی دراگر پراگر که وابسته به فشار است.

۲. بخش کلاهدک فشار

افزودن سطح تسلیم کلاهدک به مدل دراگر پراگر (که منجر به مدل کلاهدک دراگر پراگر می‌شود) دو هدف اصلی را دنبال می‌کند:

۱. سطح تسلیم را در فشرده‌سازی هیدرو استاتیک محدود می‌کند، بنابراین یک مکانیسم سخت شدن غیر ارتجاعی برای تراکم پلاستیک را نشان می‌دهد.

۲. به کنترل حجم ناشی از انبساط مصالح کمک می‌کند.

همچنین برای تحلیل، یک مدل دو بعدی با طول ۳۷۵ متر و ارتفاع ۵۹ متر با ۱۲۸ المان و ۱۵۸ گره در نظر گرفته شده است. ابعاد المان‌ها با در نظر گرفتن نسبت طول به ارتفاع برابر با ۱/۴ انتخاب شده است. خاک بررسی شده از دو لایه تشکیل شده است لایه اول بازالتی سخت و لایه دوم یک لایه نرم تقریباً همگن است. همچنین نسبت میرایی هر دو خاک ۵ درصد می‌باشد.

نتایج گرفته شده از این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

- رفتار لرزه‌ای تپه بر حسب شتاب در عمق ۱۰ متری تقریباً شبیه به موج ورودی است، اما دامنه آن نسبت به مقادیر حداکثر کمتر است. در عمق ۳۰ متری تپه تقریباً مشابه رفتار لرزه‌ای بر حسب شتاب با دامنه بیشتر نسبت به عمق ۱۰ متری دیده می‌شود. محتوای فرکانسی پاسخ در عمق ۳۰ متری کمتر از ۱۰ متر است و با توجه به فیلتر شدن بعضی فرکانس‌ها در طول انتشار امواج در خاک، این موضوع محتمل می‌باشد. رفتار لرزه‌ای تپه با افزایش PGA ورودی تا شتاب ۲/۲ خطی می‌باشد و نقاط بالای دامنه بیشتری دارند. در ارتفاع صفر و ۱۰ متری، پاسخ تقریباً با افزایش مقدار چسبندگی خاک نرم ثابت است در ۳۰ متری افزایش و در ۵۹ متری کاهش می‌یابد.

مدل استفاده شده مدل Drucker-Prager cap می‌باشد که قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک را تأمین می‌کند و قانون جریان آن از نوع همراه است. مسئله کرنش مسطح نیز در این تحقیق در نظر گرفته شده است.

توابع بارگذاری برای مدل Drucker-Prager cap که ایزوتروپیک فرض شده است دارای دو بخش است:

۱. سطح تسلیم (f_f) برای پاسخ مصالح پلاستیک کامل از رابطه (۱۵) به دست می‌آید:

$$f_f(I_1, J_2) = 0 \quad (15)$$

۲. یک کلاهدک بیضوی کرنش - سخت‌شوندگی (f_c) :

$$f_c(I_1, J_2, x) = 0 \quad (16)$$

که I_1 و J_2 ترتیب نامتغیرهای تانسور تنش و تانسور تنش انحرافی هستند. این تابع به صورت همسان حول محور هیدرو استاتیک منبسط می‌شود که به همین واسطه می‌توان پاسخ سه نوع مصالح را ارائه کرد: الاستیک، پلاستیک کامل و کرنش سخت‌شوندگی با فرض قانون جریان همراه. حرکت کلاهدک از طریق افزایش یا کاهش کرنش حجمی پلاستیک به وسیله پارامترهای پلاستیک کنترل می‌شود:

$$x : x = x \begin{pmatrix} p \\ kk \end{pmatrix} \quad (17)$$

از اینجا می‌توان ویژگی‌های اتساع و تراکم خاک را نشان داد.

در این تحقیق مسئله کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده

است و قانون جریان همراه فرض شده است $(\beta = \psi)$ ، داریم:

$$\tan \beta_{DP} = \frac{\sqrt{3} \sin \phi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \phi}} \quad (18)$$

و

$$d = \frac{c\sqrt{3} \cos \phi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \phi}} \quad (19)$$

که ϕ زاویه اصطکاک خاک (در مدل موهر کلمب)، c چسبندگی خاک (در مدل موهر کلمب)، β_{DP} زاویه اصطکاک خاک در مدل دراگر پراگر و d چسبندگی خاک در مدل

حداکثر شتاب بستر PGBA و دامنه‌ی خمیری بر پاسخ لرزه‌ای دره انجام شده است. PGBA تحریک زلزله وارده برابر 0.34g است و محدوده‌ی دامنه خمیری از ۵۰ تا ۲۰۰ متغیر است. سه مورد بررسی شده است:

- مورد A: حالت خطی (PGBA=0.034g) و $PI=200$ در نظر گرفته شده است.

- مورد B: حالت غیرخطی خفیف (PGBA=0.034g) و $PI=50$ در نظر گرفته شده است.

- مورد C: حالت غیرخطی (PGBA = ۰/۳۴ g) و $PI = ۵۰$ در نظر گرفته شده است.

توزیع نسبت تقویت (AR) که عبارت است از نسبت حداکثر شتاب سطح (PGSA) به حداکثر شتاب بستر (PGBA) را در طول دره برای هر سه مورد نشان می‌دهد. مقایسه بین مورد A و B (PGBA یکسان) به وضوح اثر دامنه خمیری را نشان می‌دهد و مقایسه بین مورد B و C (دامنه خمیری یکسان) اثر شدت لرزه را بیان می‌کند. همان‌طور که از مورد A به C می‌رویم مشاهده می‌شود که نسبت تقویت در حال کاهش است و نتیجه می‌شود غیرخطی شدن خاک باعث تضعیف امواج می‌شود. همچنین تاریخچه زمانی شتاب سطح زمین و طیف پاسخ شتاب در وسط و لبه‌ی دره به دست آورده می‌شود.

در هر دو حالت با افزایش شدت تحریک ورودی و کاهش دامنه خمیری، میزان طیف پاسخ و تاریخچه شتاب کاهش می‌یابد. این کاهش اثرات توپوگرافی به دلیل افزایش میرایی هیستریزس ناشی از غیرخطی شدن خاک است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که وقتی مصالح رسی به صورت خطی رفتار می‌کنند، رفتار دو بعدی دره و تفاوت امپدانس نسبتاً شدید لایه‌ها، اثر شدیدی را بر دامنه و محتوای فرکانسی حرکت زمین می‌گذارد. همچنین مدت زمان تحریک را هم افزایش می‌دهند با افزایش خاصیت غیرخطی خاک، دامنه‌ی حرکت کم می‌شود و اثرات تقویت دره کاهش می‌یابد. امواج ریلی و حجمی به شدت تحت تأثیر میرایی ایجاد شده ناشی از غیرخطی شدن خاک است.

- در مورد چگالی در ارتفاع ۰ تقریباً ثابت می‌باشد در ارتفاع ۱۰ متری یک مقدار افزایش دیده می‌شود در ۳۰ متری کاهش و در ۵۹ متری پاسخ تا چگالی ۱/۴ افزایش می‌یابد. در مقایسه نتایج مدل تحلیلی و رکوردهای به دست آمده کمی تفاوت در پاسخ بالای تپه دیده می‌شود.

۵- مطالعات انجام شده با روش المان طیفی

۵-۱- ساروپولوس و همکاران (Psarropoulos et al., 2007)

سؤال مطرح شده در این مقاله چنین است که رفتار غیرخطی تا چه میزان در کاهش اثرات بزرگنمایی اثرگذار است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر ژئومورفیک زیرسطحی بر حرکت لرزه‌ای سطح زمین با تأکید بر تأثیر رفتار غیرخطی خاک با استفاده از تحلیل‌های عددی است.

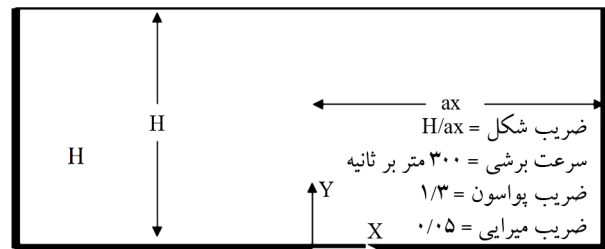
برای این منظور تحلیل‌های دو بعدی خطی و خطی معادل پاسخ زمین بر روی یک دره‌ی آبرفتی در ژاپن انجام گرفت. دره اوها اوهاشی دره‌ای کم عمق از خاکی نرم که بر روی بستری سخت و مرزهایی پرشیب قرار دارد. رفتار دو بعدی این دره در طی زلزله‌های متعددی کنترل شده است و توسط محققین بسیاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. اگرچه غیرخطی بودن خاک به شدت به بزرگای تحریک وابسته است، در برخی موارد با وجود بالا بودن حد خمیری خاک در سطح بالایی از کرنش برشی رفتار غیرخطی دیده شده است. مثالی معمول رفتار رس مکزیکوسیتی در زلزله ۱۹۸۵ است که با وجود شدید بودن زلزله خاک رفتار خطی نشان می‌دهد (خاک نرم) در این تحقیق رفتار خاک به صورت خطی و غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برای انجام تحلیل‌ها از روش‌های عددی اجزای محدود و اجزای محدود طیفی استفاده شده است. برای حالت خطی در روش اجزا محدود از نرم افزار آباکوس استفاده شده است و در روش اجزای محدود طیفی با استفاده از کد عددی AHNSE استفاده شد و برای تحلیل‌های غیرخطی نرم افزار QUAD4M به کار گرفته شد. مطالعات پارامتریک در جهت ارزیابی اثرات

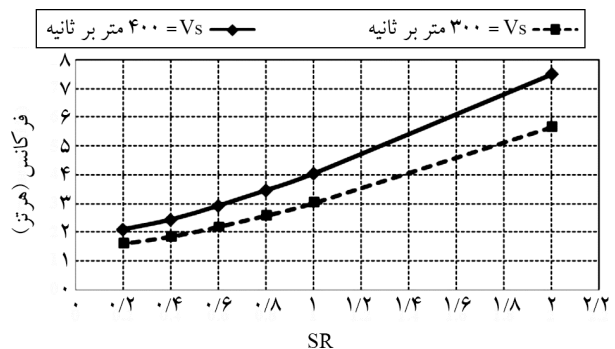
۲-۵- نجفی‌زاده و همکاران

نجفی‌زاده و همکاران (Najafizadeh et al., 2014) در سال ۲۰۱۴ به بررسی رفتار غیرخطی لرزه‌ای دره‌های آبرفتی دو بعدی با کمک المان‌های محدود طیفی پرداختند. در این پژوهش فرمولاسیون پیشرفته‌ی روش المان طیفی و کاربرد آن در حل مسائل تحلیل پاسخ ساختگاه ارائه شده است و همچنین اثرات مشخصات هندسی بر پاسخ لرزه‌ای دره‌های آبرفتی دو بعدی با رفتار ارتجاعی خطی و خمیری در مقابل امواج مهاجم برشی قائم بررسی شده است.

هندسه‌ی مورد استفاده برای مطالعه موردی در این تحقیق مطابق شکل (۸) است که در ضریب شکل‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱ و ۲ که بر اساس رابطه H/ax به دست می‌آید. عمق آبرفت ثابت و برابر با ۵۰ متر فرض شده است و با تغییر در عرض دره ضریب شکل‌های مختلف مدل شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، فرکانس طبیعی دره آبرفتی با کاهش ضریب شکل کاهش یافته و به فرکانس حالت یک بعدی نزدیک می‌گردد (شکل ۹).

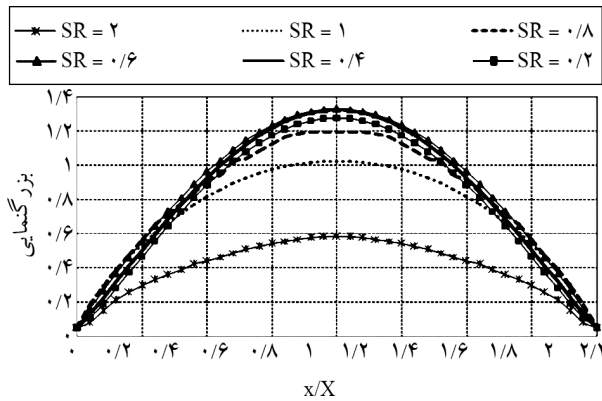


شکل (۸): هندسه دره‌ی آبرفتی دو بعدی مستطیلی شکل.



شکل (۹): فرکانس طبیعی دره‌ی آبرفتی دو بعدی مستطیلی شکل در مقابل ضریب شکل در دو سرعت موج برشی متفاوت.

بیشترین میزان نسبت بزرگنمایی در سطح دره در مرکز دره رخ می‌دهد و با نزدیک شدن به کناره‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): تغییرات بیشترین میزان نسبت بزرگنمایی در طول سطح دره در مقابل تغییرات ضریب شکل.

در تحقیق سال ۲۰۱۴ گنجی و همکاران (Ganji et al., 2014) ملاحظات دربارہ‌ی روش انتگرال‌گیری ضمنی مدل خمیری منطری-دافالیاس انجام دادند. در این تحقیق به بررسی و قیاس عملکرد دو روش انتگرال‌گیری ضمنی CPPM و CPM پرداخته‌اند. از آنجایی که هر دو روش در دسته‌ی روش‌های ضمنی قرار می‌گیرند، به عنوان یک مزیت ارزشمند هر دو روش در برابر اندازه گام‌های بزرگ پایدار باقی می‌مانند. از ضعف‌های مشترک هر دو روش می‌توان به پیچیدگی عددسازی این دسته از روش‌های انتگرال‌گیری در برابر روش‌های دیگر انتگرال‌گیری (صریح) نام برد. با این حال روش CPM در مقایسه با روش CPPM که نیازمند محاسبه مشتقات مرتبه دوم از روابط مدل مورد نظر دارد، از سادگی قابل ملاحظه‌ای بهره می‌برد و در مقابل روش CPPM در کرنش‌های بزرگ پایدار باقی می‌ماند در صورتی که روش دیگر در این حالت ناپایدار خواهد بود.

همچنین روش CPM دقت بیشتری همراه با زمان محاسباتی مورد نیاز کمتری دارد. در شکل (۱۱) خلاصه‌ای از نقاط ضعف و قوت هر دو روش آورده شده است. این جدول می‌تواند به عنوان معیاری جامع و دسته‌بندی شده در تحقیقاتی که نیازمند عددی‌سازی یک مدل رفتاری مخصوصاً در حل مسائل غیرخطی، مورد استفاده محققین قرار گیرد. به عنوان مثال در

خواهند گذاشت. مخصوصاً در زلزله‌های قوی‌تر که این اثرات بسیار چشمگیر است. این زلزله‌ها تحریکاتی با فرکانس پایین و دامنه‌ی بالاتری ایجاد می‌کند که بر روی سازه‌های منعطف تأثیر بیشتری می‌گذراند.

۲. نقاط cross-over به دلیل اثرات دره، برای همه دوره‌های تناوب، در نقاط نزدیک مرکز دره، با افزایش خاصیت دو بعدی تمایل به افزایش دارد.

۳. تغییر در زاویه سنگ بستر نه تنها روی مقادیر حداکثر طیف بزرگنمایی تأثیرگذار است، بلکه محل رخداد این مقادیر حداکثر را نیز در طول دره تغییر می‌دهد. همچنین نتایج در حوزه‌ی فرکانس نشان می‌دهد که بخش‌های مختلف دره به دوره تناوب‌های مختلفی حساس هستند.

۴. اثرات کناره‌های دره در سایت ماسه‌ای نسبت به سایت رسی بیشتر است.

۵. مهم‌ترین تفاوت دیده‌شده بین رفتار دره‌ی تک‌لایه و دو لایه در دوره تناوب تشدید بخش‌های داخلی دره است. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً در همه‌ی موارد دوره تناوب تشدید در نقاط داخلی دره‌های تک‌لایه کمتر از دره‌های دو لایه است.

۶. زاویه‌ی برخورد موج SH اثر قابل توجهی بر حرکت ورودی به دره دارد. برای سازه‌های با دوره تناوب پایین بحرانی‌ترین زاویه برخورد لزوماً صفر درجه نیست اما تقریباً در محدوده‌ی صفر تا ۳۰ درجه است. در حالی که برای سازه‌های با دوره تناوب بالا اثرات زاویه برخورد محدود است و از این رو تحلیل برخورد عمودی به تنهایی کافی است؛ اما در ارزیابی ریسک لرزه‌ای فقط برخورد عمودی در نظر گرفته می‌شود که این کار به‌ویژه برای سازه‌های با دوره تناوب طبیعی پایین (فرکانس بالا) باعث می‌شود که حرکت ورودی دست پایین در نظر گرفته شود که در این حالت باید اثرات زاویه برخورد لحاظ شود.

۷. زاویه شیب دره اثر قابل توجهی بر الگوی توزیع PGA دارد. زاویه شیب محل رخداد حداکثر پاسخ را تعیین می‌کند. بحرانی‌ترین نقاط دره بیشتر در محدوده‌ی لبه شیب دره قرار

مسائلی که تغییر شکل‌های بزرگ به خصوص روانگرایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت، روش CPPM راه‌گشا خواهد بود و در مسائلی که در محدوده تغییر شکل‌های کوچک قرار می‌گیرد روش CPM مناسب است.

| روش | CPM | CPPM |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| پایداری در برابر اندازه گام | قوی | قوی |
| پایداری در برابر روانگرایی | ناپایدار | پایدار |
| همگرایی و درجه همگرایی | همگرایی نامحدود (مرتبه یک) | همگرایی نامحدود (مرتبه یک) |
| مقایسه خطا و دقت | E | E (۲ تا ۵ درجه) |
| مقایسه زمان مورد نیاز | T | T (۲ تا ۵ درجه) |
| میزان سادگی نوشتن برنامه | نسبتاً ساده | نسبتاً ساده |

شکل (۱۱): خلاصه نتایج روش CPM و CPPM.

۶- نتیجه گیری

اگرچه اهمیت اثرات توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، امروز بر همگان آشکار شده است، اما به جهت عدم انجام مطالعات جامع در این خصوص، اغلب آیین‌نامه‌های طراحی مقاوم در برابر زلزله و نیز اغلب دستورالعمل‌های ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای تاکنون از کمی‌سازی این عامل خودداری کرده‌اند. به علت پیچیدگی روش‌های تحلیل رفتار لرزه‌ای غیرخطی عوارض توپوگرافی دو بعدی تعداد مطالعات در این زمینه محدود است که توسط محققین برجسته‌ای انجام گرفته است که به تفصیل به تعدادی از این مطالعات پرداخته شد. جمع‌بندی این مطالعات را در این بخش مورد بررسی قرار می‌دهیم.

نوع تحلیل و روش عددی استفاده شده در این موارد نیز متفاوت بود. محققینی که رفتار لرزه‌ای غیرخطی آبرفت‌های دو بعدی را بررسی کرده‌اند عمدتاً از روش‌های تفاضل محدود، المان محدود، روش المان طیفی و روش هیبرید استفاده کرده‌اند. بررسی تحقیقات انجام گرفته در این زمینه بیانگر نتایج گسترده‌ای است که به‌طور کامل تشریح شد و در ادامه مهم‌ترین آنها را مرور می‌کنیم:

۱. اثرات غیرخطی تأثیرات زیادی بر تولید امواج سطحی

که میرایی هیستریس افزایش یافته و باعث اثرگذاری بر امواج سطحی است.

۱۱. وقتی مصالح رسی به صورت خطی رفتار می‌کند، رفتار دو بعدی دره و تفاوت امپدانس نسبتاً شدید لایه‌ها، اثر شدیدی را بر دامنه و محتوای فرکانسی حرکت زمین می‌گذارد. همچنین مدت زمان تحریک را هم افزایش می‌دهند با افزایش خاصیت غیرخطی خاک، دامنه‌ی حرکت کم می‌شود و اثرات تقویت دره کاهش می‌یابد. امواج ریلی و حجمی به شدت تحت تأثیر میرایی ایجاد شده ناشی از غیرخطی شدن خاک است.

۱۲. فرکانس طبیعی دره آبرفتی ارتباط زیادی به ضریب شکل دره داشته و با کاهش ضریب شکل کاهش یافته و برعکس. ۱۳. نسبت بزرگنمایی در مرکز دره به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد و با نزدیک شدن به کناره‌ها کاهش می‌یابد.

جمع‌بندی شرایط لحاظ شده در ادبیات فنی رفتار لرزه‌ای غیرخطی عوارض توپوگرافی دو بعدی در جدول (۱) آمده است.

دارد که در معرض برخورد عمودی یا برخورد مایل با زاویه برخورد کوچک قرار می‌گیرد.

۸. بخش‌های مختلف دره به سطوح مختلفی از دوره تناوب حساس هستند. به‌طور کلی حداکثر بزرگنمایی در نقاط نزدیک کناره‌ها در دوره تناوب‌های کمتر رخ می‌دهد. با افزایش فاصله از کناره‌های دره دوره تناوب حداکثر بزرگنمایی افزایش می‌یابد. این اثر تقریباً برای همه‌ی دره‌ها دیده می‌شود. بزرگنمایی دره‌های رسی در دوره تناوب‌های بالاتری نسبت به دره‌های ماسه‌ای رخ می‌دهد. همچنین افزایش شدت تحریک به این موضوع تأثیر می‌گذارد.

۹. مدت زمان تحریک در سطح در نزدیکی کناره‌های دره، به دلیل ایجاد امواج سطحی ناشی از اندرکنش موج برشی با هندسه‌ی دره افزایش می‌یابد.

۱۰. با افزایش غیرخطی شدن خاک پاسخ در لبه‌های دره زیاد می‌شود. با افزایش غیرخطی شدن خاک فاکتور تشدید در مرکز دره در طول دره کاهش می‌یابد و به علت این است

جدول (۱): جمع‌بندی ادبیات فنی رفتار لرزه‌ای غیرخطی عوارض توپوگرافی دو بعدی.

| مدل رفتاری | موج ورودی P, SV | موج ورودی SH | روش هیبرید | روش المان محدود طیفی | روش المان محدود | روش تفاضل محدود | محققین |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--|
| ارتجاعی خمیری | | × | | | | × | تایلر و لارکین (۱۹۷۸) |
| ارتجاعی خمیری | × | | × | | | | تاکمیا و آدام (۱۹۹۸) |
| ارتجاعی خمیری | × | | | | × | | سینکرایان (۲۰۰۰) |
| ارتجاعی خمیری | × | | × | | | | گنمیری و کمالیان (۲۰۰۲) کمالیان و همکاران (۲۰۰۶) |
| ارتجاعی خمیری | | | | × | | | ساروپولوس (۲۰۰۷) |
| خطی معادل | | × | | | × | | سان و همکاران (۲۰۰۸) |
| خطی معادل | | × | | | | × | ژنگ و همکاران (۲۰۰۹) |
| ارتجاعی خمیری | × | | | | × | | گلوگاتی و همکاران (۲۰۱۰) |
| ارتجاعی خمیری | | | | | × | | گلوگاتی و همکاران (۲۰۱۲) |
| ارتجاعی خمیری | × | | | × | | | نجفی‌زاده و کمالیان (۲۰۱۴) |
| خطی معادل | | × | | | | × | ژو و همکاران (۲۰۱۵) |
| خطی معادل | × | × | | | | × | خان‌بابازاده و همکاران (۲۰۱۶) |
| خطی معادل | × | | | | | × | خان‌بابازاده و همکاران (۲۰۱۸) آیسان و خان‌بابازاده (۲۰۱۳) |
| ارتجاعی خمیری | | × | × | | | | نوحه‌گو-شاهواری و همکاران (۲۰۱۹) |

Gatmiri, B., Kamalian, M., Jafari Karimi, M., & Sohrabi, A. (2003). Transient Site Response Analysis of Two-Dimensional Saturated Sedimentary Valleys by a Hybrid FEM/BEM. *4th International Conference of Earthquake Engineering and Seismology*. Tehran, Iran.

Gelagoti, F., & et al. (2012). Nonlinear dimensional analysis of trapezoidal valleys subjected to vertically propagating SV waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102.

Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, I., Tazoh, T., & Gazetas, G. (2010). Seismic wave propagation in a very soft alluvial valley: Sensitivity to ground-motion details and soil nonlinearity, and generation of a parasitic vertical component. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(6), 3035-3054. doi:10.1785/0120100002

Gerolymos, N., Gazetas, G., & Tazoh, T. (2005). Seismic response of yielding pile in nonlinear soil. *Proc. 1st Greece-Japan Workshop, Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations*, 25-36. Athens, Greece.

Hudson, M., Idriss, I.M., & Beikae, M. (1994). QUAD4M—A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base. *Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Environmental Engineering*. Davis, California.

ICBO. (1997). *Uniform Building Code*. International Council of Building Officials.

ICBO. (2003). *International Building Code*. International Council of Building Officials.

Idriss, I. (1990). Response of soft soil sites during earthquakes. *Proceedings memorial symposium to honour Professor Harry Bolton Seed*, 273-89. Berkeley, California.

Iwan, W. (1976). On a class of models for the yielding behaviour of continuous and composite systems. *Journal Appl. Mech.*, 34, 612-692.

Iyisan, R., & Khanbabazadeh, H. (2013). A numerical study on the basin edge effect on soil amplification. *Bull. Earthq. Eng.*, 11(5). doi:doi:10.1007/s10518-013-9451-6.

Joyner, W. (1975). A method for calculating nonlinear seismic response in two dimensions. *Bulletin of Seismological Society of America*, 65(5), 1337-1357.

از نتایج به دست آمده می‌توان جهت بررسی دقیق‌تر مسائل مربوط به اثرات ساختگاه و ریزبهنه‌بندی استفاده کرد. همچنین جهت ادامه مطالعات و تحلیل‌های محققین در این زمینه بسیار حائز اهمیت است. هدف بر این است که با بهره‌مندی از نتایج تحقیقات انجام شده در گذشته، بررسی‌های کامل‌تر و پیشرفته‌تری در زمینه تحلیل غیرخطی دره‌های آبرفتی دو بعدی صورت گیرد.

مراجع

ABAQUS, Inc. (2008). *ABAQUS User's Manual*. Providence, Rhode Island.

Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Loli, M., Apostolou, M., & Gerolymos, N. (2010). Soil failure can be used for earthquake protection of structures. *Bull. Earthquake Engineering*, 8(2), 309-326.

Bardet, J.-P., & Tobita, T. (2001). *NERA: A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits*. A Report from Department of Civil Engineering, University of Southern California.

BSSC. (2003). *The NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions (FEMA 368)*. Building Seismic Safety Council.

Cundall P.A., & et al. (1980). *NESSI—Soil Structure Interaction Program for Dynamic and Static Problems, Report 51508-9*. Norwegian Geotechnical Institute.

Cundall, P. (2008). *FLAC3D Manual: A Computer Program for Fast Lagrangian Analysis of Continua (Version 4.0)*. Minneapolis, MN, USA.

Ganji, A., Jafari, M.K., Najafizadeh, J., & Kamalian, M. (2014). Considering the method of implicit integration for the Manzari-Dafalias plasticity Model. *Journal of Civil Engineering*, 30-2(2), 107-116.

Gatmiri, B., & Kamalian, M. (2002). Two-dimensional transient wave propagation in anelastic saturated porous media by a Hybrid FE/BE method. *5th European Conference. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 947-956.

- Engineering Analysis with Boundary Elements*, 105, 194-206.
- Prevost, J.H. (1985). A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils. *Int. J. Soil Dynam. Earthq. Eng.*, 4(1), 9-17. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(85\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0261-7277(85)90030-0).
- Psarropoulos, P., & et al. (2007). Linear and nonlinear valley amplification effects on seismic ground motion. *Soils and Foundations*, 47(5), 857-871.
- Sincraian, M. (2000). Nonlinear seismic response of a volcanic hill using the finite element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20, 145-154.
- Sohrabi Bidar, A., Kamalian, M., & Jafari, M. (2010). Seismic response of 3D gaussian shaped valleys to vertically propagating incident waves. *Geophysical Journal International*, 183(3), 1429-1442.
- Sun, C.-G., & Chung, C.-K. (2008). Assessment of site effects of a shallow and wide basin using geotechnical information-based spatial characterization. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(12), 1028-1044.
- Takemiya, H., & Adam, M. (1998). 2D nonlinear seismic ground analysis By FEM-BEM. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 15(1), 19s-27s.
- Takemiya, H., & Ishiyama, M. (1993). Nonlinear seismic response of Alluvium of non-flat base. *Proc. Japan Society of Civil Engineers*, No.477/I-25, 73-81, 1993.10.
- Taylor, P., & Larkin, T. (1978). Seismic site response of nonlinear soil media. *Proc. ASCE*, 104(GT3), 369-383.
- TC4. (1993). *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard*. The Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Eng.
- Zhang, J., & et al. (2009). *Response Spectral Amplification Ratios from One and Two Dimensional Nonlinear Soil Site Model*.
- Zhu, C., Thambiratnam, D., & Zhang, J. (2015). Response of sedimentary basin to obliquely incident SH waves. *Bull. Earthquake Eng.*, 14, 647-671. doi:10.1007/s10518-015-9856-5.
- Joyner, W., & Chen, A. (1975). Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bull. Seism. Soc. America*, 65(5), 1315-1336.
- Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A. (2006) Time-domain wave propagation analysis of two-dimensional elastic media by coupling BEM and FEM. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 37(1), 1-11.
- Kamalian, M., Jafari, M., Sohrabi-Bidar, A., & et al. (2006). Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid FE/BE method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 753-765.
- Khanbabazadeh, H. (2014). *The Effect of the Bedrock Slope on the Soil Amplification*. Dissertation, ITU Institute of Science and Technology, Istanbul.
- Khanbabazadeh, H., & et al. (2016). 2D non-linear seismic response of the Dinar basin, TURKEY. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 89, 5-11.
- Khanbabazadeh, H. et al. (2018). Nonlinear dynamic behavior of the basins with 2D bedrock. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 108-115.
- Kuhlemeyer, R., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *J. Soil Mech. Found Div.*, 99(EM5), 421-427.
- Liam Finn, W., & Lei, Z. (1996). Data on dynamic amplification factors under strong shaking. *International Workshop on Site Response Subjected to Strong Earthquake Motions*, 16-17, Yokosuka, Japan.
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *J. Eng. Mech.*, 95(EM4), 859-877.
- Marsh, E. (1992). *Two Dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Studies*. Dissertation, University of Auckland.
- Najafzadeh, J., Kamalian, M., Jafari, M., & Khaji, N. (2014). Seismic analysis of rectangular alluvial valleys subjected to incident sv waves by using the spectral finite element method. *International Journal of Civil Engineering*, 12(3), 251-263.
- Nohegoo-Shahvari, A., Kamalian, M., & Panji, M. (2019). A hybrid time-domain half-plane FE/BE approach for SH-wave scattering of alluvial sites.

A Literature Review on Nonlinear Seismic behavior of Two-Dimensional Alluvial Valleys

Omid Heidari^{1*}, Mohsen Kamalian² and Saeed Saeedinejad³

1. Ph.D. Candidate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: o.heidari@iiees.ac.ir
2. Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
3. M.Sc. Graduate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Alluvial valleys are one of the most important topographic features in many seismically active regions of the world. These features can have a significant impact on the seismic response of the sites located inside or near them. The seismic response of alluvial valleys is strongly influenced by the geometric shape of the valley, the mechanical properties of the sedimentary layers that fill the valley, and the type of seismic waves that enter from the earthquake source. The seismic waves that reach the site from the source may undergo amplification or deamplification due to the changes in wave velocity among different layers, reflection, refraction, and interference. This phenomenon can cause differences in the seismic response of structures that are located on the ground with different frequencies, and consequently increase the risk of damage to the structures. Therefore, the analysis of site response in alluvial valleys is of great importance.

In this paper, the numerical studies performed on the nonlinear seismic behavior of alluvial valleys under the effect of incident waves are investigated. In these studies, different methods such as finite element method, boundary element method, finite difference method, and hybrid method are used. Also, the effect of various parameters such as the geometric shape of the valley, the thickness and mechanical properties of the sedimentary layers, the type and intensity of the incident waves, the behavioral models of the materials, and the degree of nonlinearity of them on the seismic response of alluvial valleys are studied. The results obtained from these studies are compared with the existing results in the technical literature and the differences and similarities of them are determined.

In these studies, the nonlinear seismic behavior of two-dimensional and one-dimensional alluvial valleys is also investigated. The nonlinear effects on the seismic response of alluvial valleys are studied by considering different behavioral models such as linear models, bounded models, mechanical models, and hysteresis models. The results show that the nonlinear seismic behavior of two-dimensional and one-dimensional alluvial valleys can have significant differences with the linear seismic behavior of them. For example, the nonlinear seismic response of two-dimensional and one-dimensional alluvial valleys may have less amplification or deamplification than the linear seismic response of them. Also, the nonlinear seismic response of two-dimensional and one-dimensional alluvial valleys may be strongly affected by the type and intensity of the incident waves, the behavioral model of the materials, and the degree of nonlinearity of them. So, it is important to note that the results of nonlinear site response analysis are highly dependent on the specific parameters used in the analysis, such as the shear-wave velocity, mass density, and damping ratio. Therefore, these parameters should be chosen carefully, and the analysis results should be checked with field measurements or other methods.

Finally, the main summary of the effects and importance of each of these parameters for the analysis of site response in alluvial valleys is presented. Also, the difference between the various methods available in the literature and their results have been identified.

Keywords: Site Effects, Alluvial Valley, Amplification, Nonlinear Analysis.