فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل
سال ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴، (پیاپی ۲۱): صص ۲۵-۳۲

بررسی پاسخ شیروانی‌های خاکی در برابر بارهای انفجاری

حسام‌الدین حاجی ملاعلی[۱]، ابوالقاسم مظفری شمس[۲]، فریدون خسروی[۳]

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۲

چکیده

شیروانی‌های خاکی همواره تحت تأثیر بارهای دینامیکی نظیر بار زلزله و انفجار می‌باشند و در یک تحلیل کامل پایداری شیروانی، باید اثرات مربوط به هریک از این بارهای دینامیکی لحاظ گردد. بنابراین، یکی از خطراتی که همواره پایداری شیروانی‌های خاکی را تهدید می‌کند، مربوط به انفجار در سازه‌های مجاور نظیر خطوط لوله انتقال نفت و گاز، نیروگاه‌ها، انبارهای نگهداری مواد منفجره و قابل اشتعال در بنادر و غیره می‌باشد. در نتیجه برای اینکه بتوان روند طراحی معتبری را برای شیروانی‌های خاکی در معرض انفجار ارائه داد، مطالعات جامعی مورد نیاز است. لذا در تحقیق حاضر با انجام تحلیل‌های عددی مختلف سعی گردیده است تا با در نظر گرفتن شرایط مختلف، مسئله مورد نظر را مطالعه نموده و گامی رو به جلو در طراحی شیروانی‌های خاکی برداشته شود. در این تحقیق به بررسی پاسخ شیروانی‌های خاکی در معرض انفجار که یکی از نیازهای اساسی جامعه مهندسی عمران در مباحث مربوط به پدافند غیرعامل به حساب می‌آید، پرداخته شده است. همچنین پارامتر فشار بحرانی که عبارتست از فشار ناشی از انفجار بر شیروانی که آن را به آستانه ناپایداری می‌برد محاسبه گردیده و با استفاده از تکنیک تحلیل ابعادی، رابطه‌ای کلی برای ارزیابی این پارامتر ارائه گردیده است. بر این اساس مشخص گردید که افزایش فاصله میان منبع انفجار و شیروانی باعث افزایش میزان فشار بحرانی می‌گردد. همچنین با افزایش ضریب اطمینان شیروانی و نیز مقاوم‌تر شدن سیستم شیروانی، میزان فشار بحرانی نیز افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: شیروانی خاکی، ضریب اطمینان پایداری، انفجار، فشار بحرانی، مدل‌سازی عددی

۱- کارشناسی ارشد مهندسی زلزله دانشگاه علم و فرهنگ Hssmhajmollaali@gmail.com - نویسنده مسئول
۲- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)
۳- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، محققین تلاش‌های بسیاری انجام داده‌اند تا از خسارت‌های ناشی از انفجار کاسته شود. اما بیشتر این تحقیقات بر تأثیر انفجار بر روی سازه‌های ساختمانی متمرکز شده‌اند و این در حالی است که امکان بروز انفجار در زمین اطراف سازه‌ها و ایجاد اثرات مخرب بر روی سازه‌های خاکی بسیار زیاد است. از مهم‌ترین سازه‌های خاکی می‌توان به خاکریزها، سدهای خاکی، دیوارهای حائل، شیروانی‌های خاکی، تونل‌ها و پی‌ها اشاره نمود. لذا بررسی انفجارات و مطالعه اثر آن بر روی این سازه‌ها امری ضروری می‌باشد.

همانطور که اشاره گردید یکی از این موارد، مبحث شیروانی‌های خاکی می‌باشد. شیروانی‌های خاکی همواره تحت تأثیر بارهای دینامیکی نظیر بار زلزله، انفجار و غیره می‌باشند و در یک تحلیل کامل پایداری شیروانی، باید اثرات مربوط به هریک از این بارهای دینامیکی لحاظ گردد[۱]. همچنین ارتعاشات ایجادشده در اثر عملیات تروریستی، بمباران هوایی یا انفجارهای مربوط به احداث تونل می‌توانند اثرات مخربی بر روی شیروانی‌های مهم داشته باشند. علاوه‌براین عوامل، یکی از خطراتی که پایداری شیروانی‌های خاکی را تهدید می‌کند، مربوط به انفجار در خطوط لوله انتقال نفت و گاز، تونل و یا فضاهای زیرزمینی مجاور آنها می‌باشد.

به‌دلیل اهمیت ویژه‌ای که این خطوط لوله در انتقال منابع انرژی به مراکز صنعتی دارند، از آنها به‌عنوان شریان‌های حیاتی یاد می‌شود که ممکن است در اثر عملیات تروریستی، بمباران هوایی و یا کارهای عمرانی در آنها انفجار رخ دهد و این انفجارات آثار مخرب بر روی پایداری شیروانی داشته باشند. به‌عنوان نمونه می‌توان به انفجار خطوط لوله گاز در هنگام محوطه سازی در زمان ساخت سد کارون ۳ اشاره کرد.

همچنین در شرایطی که این منابع مستعد انفجار (خطوط لوله، انبارهای نگهداری مواد قابل اشتعال و غیره) در نزدیکی شیروانی‌های خاکی باشند، وقوع انفجار در آنها می‌تواند باعث ایجاد تغییر مکان‌های بزرگ و یا ناپایداری و در نتیجه، آسیب به سازه‌های مجاور گردد. به‌طور مثال در بسیاری مواقع، گروه‌های شمع بر روی شیب‌های خاکی واقع می‌شوند؛ از آن جمله می‌توان به پی ساختمان‌های واقع در شیب، کوله و پایه پل‌ها، اسکله‌های شمع و عرشه و دیگر سازه‌های ساحلی و بندری، عبور خط لوله و یا جاده‌ها از روی شیب‌های خاکی و غیره اشاره نمود که وقوع انفجار در خط لوله نزدیک به آنها می‌تواند موجب ایجاد ناپایداری در شیب و در نتیجه، آسیب به سازه‌های فوق‌الذکر شود [۲و۳].

بنابراین برای کم کردن تبعات آسیب به شیروانی‌ها در اثر انفجار، لازم است تا مطالعات دقیق و اصولی انجام شود تا طراحی شیروانی‌ها و سازه‌های مجاور آنها به بهترین نحو انجام گیرد.

هدف اصلی از تحقیق پیشنهادی را می‌توان مطالعه اثر بارگذاری انفجاری بر پایداری شیروانی‌های خاکی و ارزیابی فشار بحرانی انفجار از طریق در نظر گرفتن پارامترهای مختلف دخیل در مسئله توسط مدل‌های عددی به کمک نرم‌افزار اختلاف محدود FLAC3D دانست.

۲- مدل‌سازی هندسی شیروانی خاکی در نرم‌افزار FLAC3D و اعمال بار انفجار

تحلیل عددی انفجار و مطالعه پاسخ شیروانی در حالت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام می‌گیرد. این نرم‌افزار از روش تفاضل محدود صریح جهت تحلیل سازه‌های خاکی استفاده می‌کند و از قابلیت‌های زیادی از جمله تحلیل در حالات و شرایط مختلف، دارا بودن المان‌های سازه‌ای و المان‌های فصل مشترک، درنظرگرفتن اثر متقابل آب و فاز جامد، آنالیز دینامیکی، آنالیز انتقال حرارت و همچنین خزش در مصالح و مدل‌سازی انفجار درآن برخوردار می‌باشد [۴].

به‌طور کلی در حل عددی مسائل دینامیکی، ابعاد شبکه‌بندی باید به‌صورتی باشد که انتقال امواج به‌صورت مناسبی انجام پذیرد. بنابراین ابعاد مش‌بندی با عنایت به طول موج عبوری به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

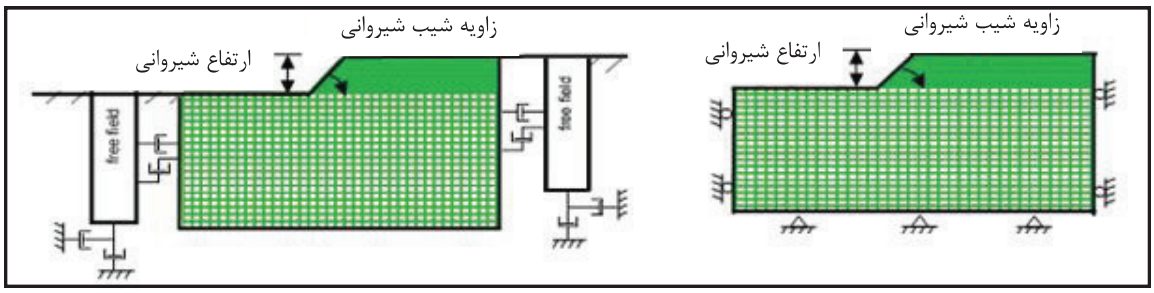
$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \qquad (۱)$$

که در آن، Δl ابعاد مش‌بندی و l طول موج انفجار است که براساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\lambda = c/\nu \qquad (۲)$$

که در آن، c سرعت موج لرزه‌ای و ν فرکانس موج تنش ناشی از انفجار می‌باشد.

پس از ایجاد مدل و اعمال مرزهای گیرداری مناسب، خصوصیات مصالح اعمال می‌گردد. از مدل رفتاری موهر – کولمب



شکل ۱- نمای شماتیک شرایط مرزی شیروانی خاکی : (الف) استاتیکی (ب) دینامیکی

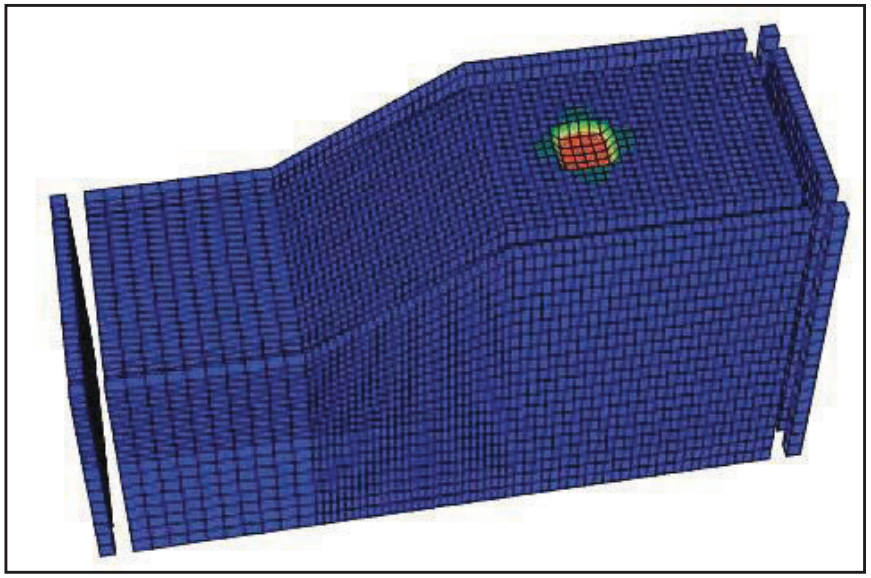
جهت مدل‌سازی مصالح استفاده گردیده است. مدل موهر - کولمب یکی از مرسوم‌ترین مدل‌های رفتاری مکانیک خاک به شمار می‌رود. این مدل، از مدل‌های تعریف‌شده در نرم‌افزار FLAC می‌باشد و نیاز به کد نویسی ندارد و راهنمای این نرم‌افزار استفاده از این مدل را توصیه کرده است . این مدل نسبت به سایر مدل‌ها عمومیت بیشتری دارد، مثلاً مدل دراگر- پراگر برای رس‌های نرم با زاویه اصطکاک کم توصیه شده است و یا در مدل کرنش سخت‌شوندگی باید خصوصیات مصالح براساس تابعی از کرنش بحرانی باشد. این مدل دارای ۵ پارامتر مدول الاستیسیته، ضریب پوآسون (رفتار الاستیک)، چسبندگی، زاویه اصطکاک خاک و زاویه اتساع (رفتار پلاستیک) بوده و به‌صورت ارتجاعی خمیری کامل است [۴].

به‌منظور ایجاد شرایط واقعی انتشار موج تنش و جلوگیری از انعکاس امواج به درون مدل بعد از برخورد به مرزها، شرایط مرزهای آزاد به مدل اختصاص یافته است. نمای شماتیک از شرایط مرزی استاتیکی و دینامیکی مدل در شکل (۱) نمایش داده شده است.

تنش فشاری ناشی از انفجار در محدوده مورد نظر و براساس قطر حفره انفجاری روی سطح دایروی که فاصله مرکز آن تا شیروانی R می‌باشد، اعمال می‌گردد. شایان ذکر است تنش انفجاری به‌صورت یک پالس تنش عمود بر حفره انفجاری وارد می‌شود. در شکل (۲) گودال ایجادشده در اثر انفجار در پشت شیروانی، نشان داده شده است.

۳- فشار میدان آزاد و بارگذاری انفجار

روش‌های مختلفی برای تخمین عددی فشار میدان آزاد بیشینه در هر نقطه از اطراف یک منبع انفجاری وجود دارد. این روابط تجربی، هم از آزمایش‌های هسته‌ای و هم از سلاح‌های معمول



شکل ۲- ایجاد گودال انفجار در پشت شیروانی

به‌دست آمده‌اند[1] [۵].

برای سلاح‌های معمول، راه حل ارائه‌شده توسط دراک و لیتل[2]، که معادله لیتل دراک[3] نامیده می‌شود، تاکنون به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش در آئین‌نامه‌های طراحی سازه‌های امن ارتش و نیروی هوایی ایالات متحده نیز جهت کارهای عملی آمده است. مزیت اولیه معادله لیتل دراک این است که بر مبنای یک مجموعه گسترده از داده‌های تجربی به‌دست آمده است، همچنین این رابطه در عین حال که ساده می‌باشد، پارامترهای مختلفی را که کنترل کننده میرایی فشار بیشینه با فاصله از محل انفجار می‌باشند، در خود جای داده است و در نهایت اینکه نتایج معتبری را به‌دست می‌دهدکه در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

پالس فشار و سرعت ذرات می‌تواند از تاریخچه زمانی مربوط به انفجار و کاهش سریع دامنه به‌دست آید. در این مورد، t_a زمانی است که موج انفجار از محل انفجار تا نقطه‌ای مورد نظر طی می‌کند و با رابطه زیر مشخص می‌شود[۶]:

$$t_a=\frac{R}{c} \qquad (۳)$$

که در این رابطه، R فاصله نقطه مورد نظر تا محل انفجار و c سرعت لرزه‌ای ذرات می‌باشد. در این صورت موج انفجار در زمان t_r به اوج خود می‌رسد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

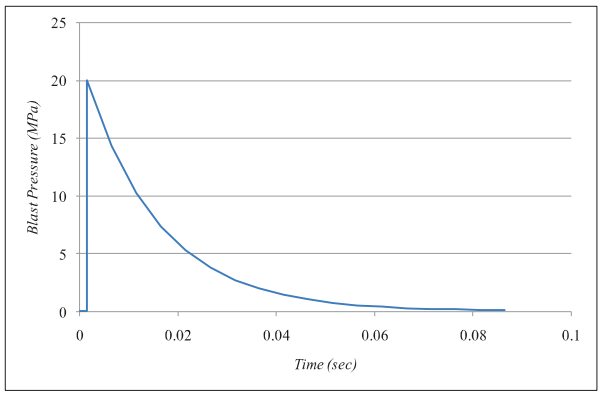
$$t_r=0.1t_a \qquad (۴)$$

فشار از مقدار حداکثر به اندازه زمان t_a یا تا سه برابر آن به مقدار صفر می‌رسد که فشار و سرعت به‌صورت روابط زیر تعریف می‌شوند.

$$p(t)=P_0e^{-\alpha t/t_a} \qquad (۵)$$

که در این رابطه، P(t) فشار ناشی از انفجار و α مقدار ثابتی است که برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. در واقع بارگذاری انفجاری به‌صورت یک پالس با تاریخچه نمایی از مرکز انفجار در نظر گرفته می‌شود که در نمودار شکل (۳) بر حسب فشار- زمان ارائه گردیده است.

مقدار c عموماً سرعت موج فشاری نامیده می‌شود که این



شکل ۳- نمودار پالس تنش انفجاری وارده بر سطح مورد نظر

پارامتر را می‌توان از طریق رابطه بین سختی و چگالی خاک نیز برآورد کرد:

$$c=\sqrt{\frac{M}{\rho}} \qquad (۶)$$

که در آن: M (Constrained Modulus) پارامتر مبین سختی و ρ چگالی خاک است. پارامتر M را می‌توان از طریق آزمایش ستون تشدید به‌دست آورد. آزمایش ستون تشدید معمولاً برای تعیین مدول برشی در کرنش‌های کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد و به همراه مدول یانگ می‌تواند برای محاسبه نسبت پواسون به‌کار رود. در نهایت می‌توان با استفاده از نسبت پواسون و مدول یانگ توسط رابطه زیر پارامتر M را محاسبه نمود:

$$\mu=\frac{E}{2G-1} \qquad (۷)$$

$$M=\frac{E(1-\mu)}{(1-\mu)(1+\mu)} \qquad (۸)$$

که در آن، E مدول یانگ و μ نسبت پواسون است.

$p_0(kg/cm^2)$ و $V_0(m/s)$ مقدار حداکثر فشار و سرعت می‌باشند که به‌وسیله رابطه زیر با هم در ارتباط هستند.

$$P_0=\rho cV_0 \qquad (۹)$$

$$P_0=0.255f\times\rho c\times\left[\frac{2R}{\sqrt[3]{W}}\right]^{-n} \qquad (۱۰)$$

$$V_0=f\times\frac{160}{144}\times\left[\frac{2R}{\sqrt[3]{W}}\right]^{-n} \qquad (۱۱)$$

که در آن، f ضریب بدون بعد بوده و نقش کاهندگی دارد و n ضریب رقیق‌شدگی می‌باشد. همچنین پارامترهای R و W نیز

1– Drake and Little, 1983; Westine and Friesenhahn, 1983; Henrych, 1979; Drake et al, 1989;
2- Drake and Little (1983)
3- Little- Drake

به‌ترتیب بیانگر فاصله از محل انفجار و وزن ماده منفجره می‌باشند.

در روابط فوق، همگی پارامترها به کمک انجام آزمایش یا توصیه‌های ارائه‌شده در ادبیات فنی قابل حصول هستند. بنابراین به‌راحتی می‌توان روابط ۵ و ۱۰ را برحسب R نوشت. در مدل‌سازی عددی انفجار در نرم‌افزار FLAC لازم است که پالس تنش به‌دست آمده از رابطه (۳) به‌صورت عمودی بر سطح مورد نظر اعمال گردد.

برای محاسبه ابعاد گودال انفجار و پالس تنش اعمالی به مرزهای آن، از روابط تجربی ارائه‌شده توسط محققین استفاده گردیده است. عمق گودال ایجاد شده ناشی از انفجار سطحی ماده منفجره (TNT) را می‌توان از رابطه (۹) تخمین زد:

$$D = 0.51\ W^{1/3} \qquad (۱۲)$$

که در آن، D قطر حفره انفجاری و W وزن ماده منفجره (TNT) است[۵].

۴- مطالعه پارامتری شیروانی خاکی در مقابل بار انفجاری

در این قسمت سعی می‌گردد تا با انجام مطالعه پارامتری، نسبت به رفتار شیروانی‌های خاکی در مقابل بارهای انفجاری، شناخت بهتری حاصل گردیده و نحوه تأثیر پارامترهای مختلف در پدیده مورد نظر، مطالعه گردد. بدین منظور تحلیل‌های متعددی بر روی مثال‌های فرضی قابل مقایسه با یکدیگر انجام گردیده که در ادامه شرح داده خواهند شد.

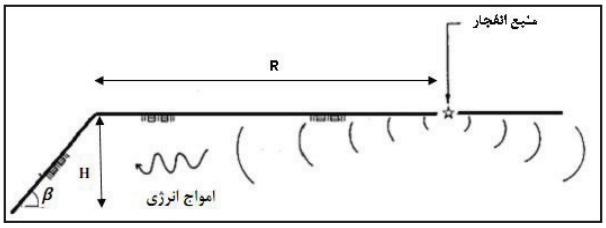
مشخصات تحلیل‌های انجام‌شده:

با توجه به هدف اصلی از انجام تحلیل‌های پارامتری در این بخش، مشخصات مدل‌های تحلیلی و پارامترهای متغیر در آنها به‌گونه‌ای تنظیم گردید که تأثیر پارامترهای زیر مورد بررسی قرار گیرد:

- نوع خاک
- زاویه شیب شیروانی (β)
- فاصله چشمه انفجار تا شیب خاکی
- فشار انفجار

هریک از این پارامترها در شکل (۴) نمایش داده شده و مقادیر متناظر آنها نیز در جدول (۱) ذکر گردیده‌اند.

در ارتباط با متغیرها و پارامترهای انتخاب‌شده جهت انجام تحلیل‌های پارامتری، ذکر این نکته ضروری است که در مورد



شکل ۴- متغیرهای مختلف منظورشده در تحلیل پارامتری

جدول ۱- متغیرها و پارامتری انتخابی برای تحلیل پارامتری

زاویه شیب شیروانی (β)	فاصله منبع انفجار تا شیب (R) (متر)		
۳۷	**۲۰**		
۳۰	۲۵		
۲۵	۳۰		
فشار انفجار (مگاپاسکال)	نوع خاک		
	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)
۱۰	۵	۲۰	۱۰
۲۰	**۵۰**	**۳۰**	**۲۰**
۳۰	۱۰۰	۴۰	۴۰
۴۰			

هریک از متغیرها، یک مقدار به‌عنوان مقدار مبنا فرض شده که در جداول فوق به‌صورت (*Bold-Italic*) نشان داده شده است. تحلیل‌های انجام‌شده با مقادیر مبنا، تحلیل‌های مبنا را تشکیل می‌دهند که مبنای مقایسه در هر پارامتر متغیر در بررسی و بحث بر روی نتایج خواهند بود.

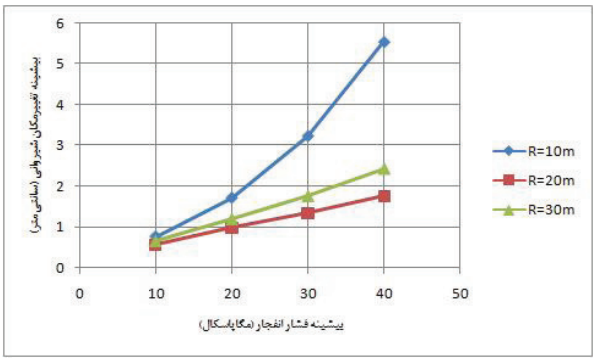
۵- نتایج تحلیل پارامتری

با توجه به پارامترها و متغیرهای در نظر گرفته شده، تحلیل‌های متعددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC۳D انجام گردیدند. دو پارامتر فشار بحرانی و تغییرمکان شیروانی به‌عنوان پارامترهای رفتاری انتخاب و نتایج به‌دست‌آمده برای این دو متغیر مورد بررسی قرار گرفتند. بدین صورت که با مطالعه و مقایسه این پارامترها با سایر خصوصیات رفتاری و یا فیزیکی شیروانی، اقدام به بررسی پاسخ شیروانی در شرایط مختلف گردید. در خصوص فشار بحرانی لازم به ذکر است که این فشار، بیشینه فشار ناشی از انفجار است که در صورت اعمال به شیروانی، آن را به آستانه گسیختگی می‌برد. همچنین این فشار طی یک روند سعی و خطا حاصل گردید. بدین صورت که مقدار مبنایی برای آن انتخاب گردید و سپس با افزایش یا کاهش این مقدار، سعی گردید تا شیروانی به حالت گسیختگی برسد. معیار گسیختگی شیروانی نیز با توجه به شرایط کرنشی خاک در نظر گرفته شد. بدین صورت که هرگاه نسبت تغییرمکان‌های ایجادشده به ارتفاع شیب (D/H) در حدود ۰/۰۱ شد، شیروانی در آستانه ناپایداری می‌باشد [۷]. در ادامه، به ارائه نمودارها و نتیج حاصل و بحث بر روی آنها با تکیه بر هریک از پارامترهای مورد بررسی پرداخته شده است.

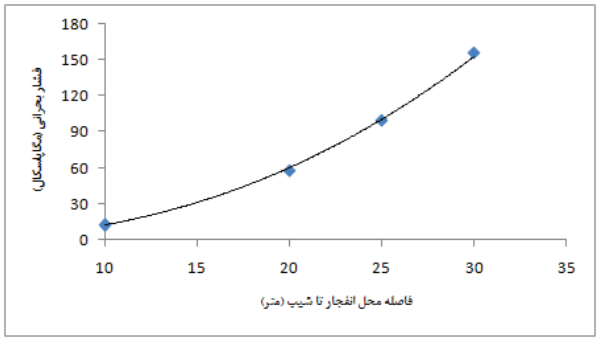
۵- ۱- تأثیر فاصله منبع انفجار از شیروانی (R)

در شکل (۵)، رابطه میان فشار انفجار و تغییر مکان شیروانی برای فاصله‌های مختلف منبع انفجار تا محل شیروانی به نمایش در آمده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، در فشارهای یکسان، کاهش فاصله میان منبع انفجار و شیروانی، باعث افزایش تغییرمکان‌ها می‌گردد. همچنین با دقت در این شکل ملاحظه می‌گردد که تغییرمکان شیروانی، از فاصله ۲۰ به ۱۰ متر نسبت به فاصله ۳۰ به ۲۰ متر با نرخ بیشتری افزایش یافته است و این بدان معناست که در فاصله معینی، انفجار منجر به گسیختگی شیروانی خواهد شد که این فاصله، فاصله بحرانی نام دارد. لذا طراحان باید دقت نمایند که در فواصل خاصی تغییرمکان‌ها به‌طور چشمگیری افزایش خواهند یافت و در طراحی‌ها همواره باید دقت گردد که سازه‌ای که در آن احتمال انفجار وجود دارد و مقرر است تا در مجاورت شیروانی احداث گردد، به میزان قابل قبولی از فاصله بحرانی فاصله داشته باشد.

رابطه میان فاصله منبع انفجار تا محل شیروانی و فشار بحرانی در شکل (۶) نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، با افزایش فاصله از محل شیروانی، میزان فشار بحرانی افزایش می‌یابد.



شکل ۵- رابطه میان بیشینه فشار انفجار و بیشینه تغییرمکان شیروانی



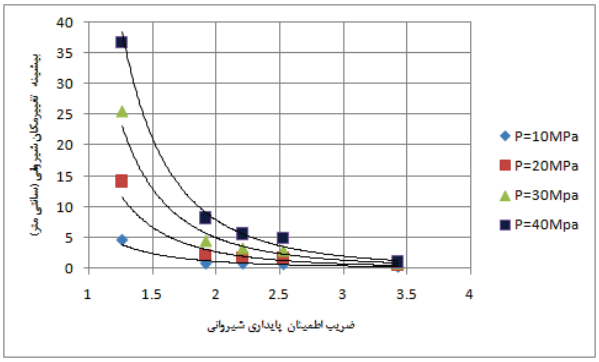
شکل ۶- رابطه میان فاصله محل انفجار تا شیروانی و فشار بحرانی

۵- ۲- تأثیر ضریب اطمینان

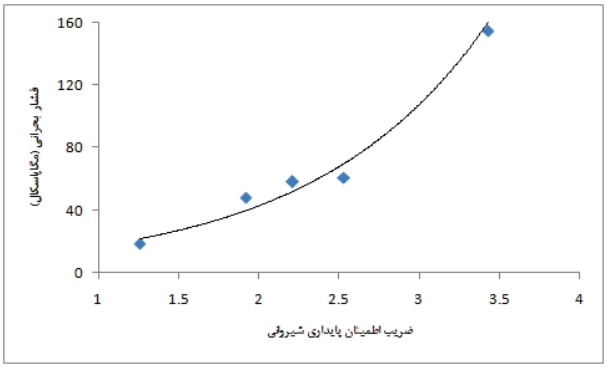
اثر مقاومت خاک بر روی پاسخ شیروانی با استفاده از پارامتر ضریب اطمینان مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۷) رابطه میان ضریب اطمینان پایداری و تغییرمکان شیروانی در برابر فشارهای مختلف ترسیم گردیده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش ضریب اطمینان شیروانی، تغییرمکان‌ها در برابر انفجار کاهش می‌یابند. نتیجه دیگری که از این شکل می‌توان گرفت، این است که در ضریب اطمینان‌های کم، حساسیت بیشتری نسبت به انفجار وجود دارد. به‌عنوان مثال در ضریب

اطمینان ۲,۵ تغییرمکان‌ها با نرخ بسیار بیشتری نسبت به ضریب اطمینان ۱/۵، کاهش یافته‌اند که این مسئله خود گواه نتیجه فوق‌الذکر می‌باشد.

در شکل (۸)، رابطه میان ضریب اطمینان پایداری شیروانی و فشار بحرانی نشان داده شده است. با توجه به این شکل در می‌یابیم که با افزایش ضریب اطمینان شیروانی، میزان فشار بحرانی نیز افزایش می‌یابد. این بدان معنا است که هرچه ضریب اطمینان افزایش می‌یابد، سیستم مقاوم‌تر شده و لذا میزان فشار بیشتری برای گسیختگی آن نیاز می‌باشد.



شکل ۷- رابطه میان ضریب اطمینان و تغییرمکان شیروانی در مقابل فشارهای مختلف انفجار



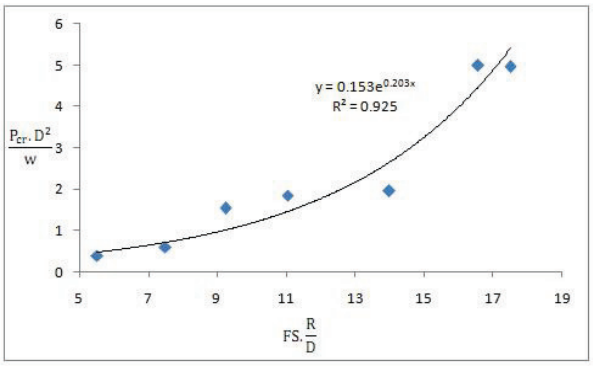
شکل ۸- رابطه میان ضریب اطمینان پایداری شیروانی و فشار بحرانی

۶- تحلیل ابعادی

نتایجی که تاکنون ارائه گردیدند، تا حدودی کلی بوده و هریک پاسخ شیروانی را در حالتی خاص ارزیابی می‌نمایند. همچنین به‌دلیل حضور پارامترهای فیزیکی و رفتاری موجود و تأثیرات متفاوت هریک از آنها بر پاسخ سیستم، نیاز به استفاده از تحلیل ابعادی و بی‌بعدسازی پارامترها در جهت نیل به یافتن رفتار و رابطه واحد می‌باشد. لذا به‌منظور دستیابی به رفتار کلی شیروانی‌های خاکی در برابر انفجار و همچنین ارزیابی فشار بحرانی شیروانی، تحلیل ابعادی انجام گردید. در واقع در این رویکرد سعی بر این است تا با مرتبط نمودن دو پارامتر ضریب اطمینان و فشار بحرانی، روشی جهت ارزیابی شیروانی در مقابل انفجار ارائه گردد؛ بدین صورت که پارامترهای هندسی و رفتاری مختلف دخیل در مسئله، با یکدیگر ترکیب شده و این ترکیب‌های مختلف در قالب نمودارهایی ترسیم گردیدند. بین برخی از ترکیب‌های حاصل، همبستگی چندان مطلوبی موجود نبود و سایر ترکیب‌ها نیز به‌طور کامل گویای رفتار مورد نظر نبودند. به غیر از دو پارامتر بی‌بعد $FS.\frac{R}{D}$ و $\frac{P_{cr}.D^2}{w}$ که همانطور که در شکل (۹) ملاحظه می‌گردد، علاوه‌بر انعکاس پاسخ صحیح سازه، همبستگی بسیار مطلوبی نیز بین آنها موجود می‌باشد. ($R^2>0.9$) همچنین در جدول (۲) شرح پارامترهای مورد استفاده ذکر گردیده است. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش ضریب اطمینان شیروانی و در واقع مقاوم‌تر شدن بیشتر سیستم در بار بر حرکت ورودی، فشار بیشتری جهت گسیخته نمودن شیروانی نیاز است و این به معنای افزایش فشار بحرانی سیستم می‌باشد.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در تحلیل ابعادی و شرح آنها

پارامتر	بعد	شرح
R	متر	فاصله منبع انفجار تا شیروانی
FS	-	ضریب اطمینان پایداری
P_{CR}	مگاپاسکال	فشار بحرانی شیروانی
D	متر	قطر حفره انفجار
w	نیوتن	وزن ماده منفجره



شکل ۹- رابطه بین پارامترهای بی‌بعد $FS.\frac{R}{D}$ و $\frac{P_{cr}.D^2}{w}$

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پاسخ شیروانی‌های خاکی در برابر بارگذاری انفجاری مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت و سعی گردید تا با بررسی اثر پارامترهای مختلف دخیل در مسئله مورد بررسی، گامی رو به جلو در زمینه شناخت رفتار شیروانی‌های خاکی در برابر انفجار برداشته شود. مهم‌ترین نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۱. به‌دلیل اینکه در شرایط بارگذاری انفجاری، امکان تأثیر انفجار در پارامتر ضریب اطمینان وجود ندارد، لذا نمی‌توان پایداری شیروانی را با استفاده از این پارامتر مورد ارزیابی قرار داد. بنابراین در این تحقیق، پارامتر جدیدی به نام فشار بحرانی شیروانی تعریف گردید و در شرایط مختلف مورد بررسی واقع شد. سپس با استفاده از تحلیل ابعادی و ایجاد ارتباط بین دو پارامتر ضریب اطمینان پایداری و فشار بحرانی شیروانی، سعی گردید تا این امکان فراهم شود که پایداری شیروانی در برابر انفجار از طریق ارزیابی پارامتر فشار بحرانی شیروانی تحلیل و بررسی گردد. پارامترهای بی‌بعدبه‌دست آمده در این خصوص به‌ترتیب $FS.\frac{R}{D}$ و $\frac{P_{cr}.D^2}{W}$ و رابطه بین آنها به‌صورت $y=0.153e^{0.203x}$ می‌باشد که در شکل (۹) نشان‌داده شده‌اند.

۲. کاهش فاصله میان منبع انفجار و شیروانی، باعث افزایش تغییرمکان شیروانی می‌گردد و هرچه این فاصله به فاصله بحرانی نزدیکتر می‌شود، تغییرمکان‌ها با نرخ بیشتری افزایش می‌یابند. افزایش فاصله میان منبع انفجار و شیروانی باعث افزایش میزان فشار بحرانی می‌گردد.

۳. افزایش ضریب اطمینان شیروانی، موجب کاهش تغییر مکان‌های به‌وجودآمده در شیروانی بر اثر انفجار خواهد شد. همچنین در ضریب اطمینان‌های کم، حساسیت بیشتری نسبت به انفجار وجود دارد و تغییرمکان‌ها با شدت بیشتری افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش ضریب اطمینان شیروانی و مقاوم‌تر شدن سیستم شیروانی، میزان فشار بحرانی نیز افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Sangroya, R.; Chatterjee, K.; Choudhury,D., “Effect of Blast Load on Seismic Slope Stability Using FLAC”, Indian Geotechnical Conference, Kochi, (**2011**).
2. Sangroya, R.; Choudhury, D. “Stability Analysis of Soil Slope Subjected to Blast Induced Vibrations Using FLAC3D”, GeoCongress, ASCE, 472-481, (**2013**).
3. De, A. and Conry, R, “Modeling of Surface Blast effects on Underground Structures” Geo-Frontier 2011, Geotechnical Special Publication No. 211, ASCE, 1534-1543, (**2011**).
4. FLAC^{3D}. “Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 2.1, User's Manual”. Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA, (**2002**).
5. Bangash, M.Y.H., (1993), “Shock, Impact and Explosion Structural Analysis and Design”, Springer Publication, First Edition (December 8, (**2008**).
6. TM 5-855-1, “Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons”, US Army Engineer Waterways Experiment Station, (**1984**).
7. NCHRP Report 611 (2008), “Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Buried Structures, Slopes and Embankments”, Transportation Research Board, Washington, D.C. (**2008**)