



## تحلیل رفتار دینامیکی حفرات زیرزمینی عمیق با استفاده از روش المانهای مرزی

محمد رحیمیان<sup>۱</sup>، سلمان رضازاده بقال<sup>۲</sup>، بابک امیدوار<sup>۳</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۲- کارشناس ارشد سازه دانشگاه تهران

۳- استادیار دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

Sal\_rezazadeh@yahoo.com

### خلاصه

برای بررسی رفتار لرزه‌ای حفراتی که در عمق زمین قرار گرفته اند نیاز به مدل‌سازی محیط بینهایت خاک و حل معادله انتشار امواج با توجه به هندسه و مرز این حفرات می‌باشد. این حفرات در محیط‌های با سختی زیاد مانند سنگ که نیازی به دیواره نیست، ساخته می‌شوند و یا به طور طبیعی شکل گرفته اند. با توجه به محیط بینهایت خاک تنها کافی است معادله انتشار امواج با مدل‌سازی مرز حفره با استفاده از روش عددی المان مرزی<sup>۱</sup> حل شود. با حل معادلات انتگرال مرزی حاصل به روش عددی و ارضای شرایط مرزی (در سطح داخلی حفره بردارهای تنش برابر صفر می‌باشند) بردار تغییر مکانهای مرز حفره حاصل می‌گردد و بدین ترتیب رفتار لرزه ای حفره، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: محیط بینهایت، مدل‌سازی حفره، المان مرزی، فضای سه بعدی، فضای فرکانسی، تحلیل دینامیکی

### ۱. مقدمه

تونل‌های زیرزمینی از مهمترین سازه‌های موجود در هر کشوری هستند که تحلیل و طراحی آن از جمله موارد نسبتاً دشوار برای مهندسی می‌باشد. در بسیاری از موارد این تونلها در محیط‌های با سختی زیاد مانند سنگ که نیازی به دیواره نیست، ساخته می‌شوند و در واقع ما با یک حفره مدفون در عمق خاک روبرو هستیم. در مرز محیط یعنی در سطح داخل حفره، بردارهای تنش برابر صفر می‌باشند. هدف از این مقاله ارائه یک فرمول‌بندی عددی برای تعیین پاسخ دینامیکی این حفرات زیرزمینی در برابر امواج زلزله یا انفجار در دامنه فرکانسی می‌باشد. روش حل بر مبنای روش المانهای مرزی می‌باشد. با اعمال شرایط مرزی و با استفاده از الگوریتم ارائه شده برای روش BEM می‌توان مساله را حل نمود و توزیع تنش و تغییر مکان را در سطح داخلی حفره بدست آورد. این روش وقتی که در محیط نیمه بینهایت یا بینهایت مورد بررسی قرار می‌گیرد، بدلیل آنکه مساله را به مرز کاهش می‌دهد، بسیار کاربرد دارد. همچنین شرط تشعشع به طور اتوماتیک ارضا می‌شود و دیگر نیازی به مرزهای غیر انعکاسی که در روشهای دامنه‌ای مانند اجزای محدود و تفاوت‌های محدود وجود آنها ضروری بود، نمی‌باشد. بر این اساس یک برنامه کامپیوتری با استفاده از زبان فرترن نوشته که با استفاده از آن به حل مسایل عملی می‌توان پرداخت.

### ۲. فرمول‌بندی مساله

یکی از روشهای عددی حل مسائل مقدار مرزی، روش المان مرزی می‌باشد. این روش بهترین روش برای حل مسائل انتشار امواج الاستیک بویژه در محیطهای بینهایت و نیمه بینهایت می‌باشد. در این روش ابتدا معادله دیفرانسیل حرکت به معادله انتگرال مرزی تبدیل می‌شود و سپس این معادله به صورت عددی حل می‌شود. برای حل این معادله، ابتدا مرز حوزه المان بندی می‌شود و متغیرهای مرزی با استفاده از توابع شکلی تقریب زده می‌شوند. سپس انتگرالهای منفرد و غیرمنفرد محاسبه و سیستم معادلات تشکیل شده و برای متغیرهای مرزی مجهول حل می‌شوند. در این روش ابتدا مرز  $\Gamma$  به  $NE$  المان مرزی تقسیم می‌شود. هر المان مرزی از  $n$  گره تشکیل شده است و تعداد کل گره‌ها  $N$  می‌باشد. برای المان بندی مرز حفره در این مقاله